



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КІЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ – 1. БАЗОВІ ПРИНЦИПИ ТЕОРІЇ ТЕПЛОМАСООБМІНУ: ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»,
спеціалізацією «Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та
нафтопереробних виробництв»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2018

Процеси та обладнання хімічних технологій – 1. Базові принципи теорії тепломасообміну: лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: А.Р. Степанюк, С.В. Гулієнко – Електронні текстові данні (1 файл: 2,59 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 69 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 8 від 18.14.2018 р.)
за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету
(протокол № 1 від 29.01.2018 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ – 1. БАЗОВІ ПРИНЦИПИ ТЕОРІЇ ТЕПЛОМАСООБМІНУ: ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладачі: *Степанюк Андрій Романович*, канд.тех. наук, доц.
Гулієнко Сергій Валерійович, канд. тех. наук, ст. викл.

Відповідальний редактор *Корнієнко Я.М.* докт. тех. наук, професор

Рецензенти: *Сокольський О.Л.* , канд.тех. наук, доц.

У збірнику лабораторних робіт коротко викладено матеріали для проведення п'яти лабораторних робіт: Визначення режимів течії рідини, визначення гідравлічного опору циклону, Дослідження гідравлічного опору насадкових колон, Дослідження гідравлічного опору мембранних модулів та Визначення характеристик відцентрового насосу. До кожної лабораторної роботи наведено теоретичні відомості, опис експериментальної установки, методику проведення експерименту, відомості про обробку результатів експериментів, контрольні запитання та перелік посилань.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ ТЕЧІЇ РІДИНИ	7
1.1 Вступ	7
1.2 Теоретична частина	7
1.3 Опис експериментальної установки	10
1.4 Методика проведення експерименту	11
1.5 Обробка результатів експериментів	12
1.6 Контрольні запитання.....	13
1.7 Перелік посилань	14
2. ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ ЦИКЛОНУ	15
2.2 Теоретична частина	15
2.3 Опис експериментальної установки	20
2.4 Техніка безпеки.....	21
2.5 Методика проведення роботи	22
2.7 Контрольні запитання.....	26
2.8 Перелік посилань	27
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ НАСАДКОВИХ КОЛОН.....	28
3.1 Вступ	28
3.2 Теоретичні відомості	29
3.3 Схема дослідної установки	33
3.4 Техніка безпеки.....	34
3.5 Методика проведення експериментів.....	34
3.6 Аналіз та обробка результатів досліджень.....	36
3.7 Контрольні запитання.....	37
3.8 Перелік посилань	38
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ МЕМБРАННИХ МОДУЛІВ	39
4.1 Вступ	39
4.2 Теоретичні відомості	40
4.3. Опис експериментальної установки	45

4.4 Техніка безпеки.....	47
4.5 Методика проведення експериментів.....	48
4.6 Обробка результатів досліджень	49
4.7 Аналіз отриманих результатів та основні висновки	52
4.8 Перелік посилань.....	52
4.9 Контрольні запитання.....	53
5 ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСУ	55
5.1 Вступ	55
5.2 Теоретична частина	56
5.3 Опис експериментальної установки	61
5.4 Техніка безпеки.....	62
5.5 Методика проведення роботи	62
5.6 Обробка результатів експериментів	64
5.8 Перелік посилань.....	69

ВСТУП

Для створення єдиного уявлення про умови протікання процесів хімічної технології необхідне розуміння про умови переміщення рідин і газів, з основними поняттями, гіпотезами, аксіомами, фундаментальними законами, а також деякими аспектами історичного розвитку цих процесів. Механіка рідин та газів є базовою інженерною дисципліною, особливо для інженерів механіків, які навчаються спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізацією «Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв». При вивченні дисципліни студенти оволодівають основними законами рівноваги і руху крапельних і газоподібних рідин, а також їх силового взаємодії з твердими тілами. Закони гідравліки широко використовуються під час вирішення практичних завдань у багатьох галузях техніки: хімічному машинобудуванні; нафтопереробці, мембранній техніці, переробці полімерів, виробництві фармацевтичних препаратів та холодильній техніці, водопостачанні та постачанні повітрям, тощо.

Механіка рідини має глибоке історичне коріння. Походження цієї науки досить ненозривно пов'язане з розвитком людства. Явища, які стосуються гідравліки, цікавили людину ще в давні часи. Багато практичних питань пов'язаних із зрошенням, водопостачанням та використанням водної енергії. Розвиток науки пройшов складний шлях від перших, примітивних, водопроводів до сучасних каналізаційних систем та водопостачання. Від примітивних двигунів до сучасних насосів та вентиляторів.

Перший законом гідравліки, який установлює кількісний зв'язок між окремими елементами явищ, вважають загальновідомий закон Архімеда, описаний в трактаті "Про плаваючі тіла" описаний за 250 років до н. е. Далі розвитком гідравліки займалися вчені XVI та XVII ст. Нідерландський учений Сімон Стевін встановив правила визначення тиску рідини на стінку і дно посудини (1548–1620 рр). Італійський фізик і математик Еванджеліста Торрічеллі (1608–1647 рр), учень Галілео Галілея (1564-1642 рр), відкрив закон

витікання рідини з посудини і запропонував залежність, у якій визначено швидкість витікання рідини з малого отвору в посудині під дією сили тяжіння. Французький математик і фізик Блез Паскаль запропонував закон, який і досі називається законом Паскаля (1623-1662 рр). Засновником гідравлики, як науки вважається Даниїл Бернуллі (29 січня (8 лютого) 1700 – 17 березня 1782). У XVIII ст. почала розвиватися теоритична гідродинаміка, яка ґрунтувалася на диференціальних рівняннях руху ідеальної рідини Ейлера (15 квітня 1707 – 7 (18) вересня 1783).

Розвиток теоритичної гідродинаміки дозволив вирішити велику кількість теоретичних та практичних задач – від знаходження гідравлічного опору апаратів та трубопроводів, тобто від підбору насосів необхідної потужності до створення фізичних і математичних моделей протікання самих процесів.

Особливу увагу необхідно приділяти засвоєнню теоретичних знань у практичному відпрацюванні лабораторних робіт.

1. ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ ТЕЧІЇ РІДИНИ

1.1 Вступ

Закономірності явищ, що відбуваються в потоці рідини, наприклад, гідравлічний опір, тепло- та масопередача, тощо суттєво залежать від режиму течії. Тому важливо вміти визначати режим течії рідини для того, щоб розрахувати ті, чи інші параметри процесів, що протікають в потоці.

При складанні методичних вказівок використано матеріали методичних вказівок [1].

Мета та задачі дослідження

Мета роботи - отримати наочне уявлення про режими течії рідини і показати зв'язок між станом потоку і значенням числа Рейнольдса. Для цього необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) на підставі візуальних спостережень руху тонкого підфарбованої цівки забарвленої води, введеної в потік, який рухається по скляній трубці, виявити області ламінарного та турбулентного режимів руху води і перехідної області;
- 2) визначати значення чисел Рейнольдса для характерних станів потоку, спочатку безперервно збільшуючи, а потім зменшуючи швидкість руху води.

1.2 Теоретична частина

Матеріал викладено за авторами [1...4].

Досвід показує, що при русі рідин і газів можуть спостерігатися два режими руху: ламінарний і турбулентний. При ламінарному (струменевому, шаровому) режимі течії потік середовища носить лінійно-струменевий характер. Якщо, наприклад, в ламінарний потік води, що рухається в скляній трубці, ввести тонку підфарбовану цівку, то вона (точно так, як і струмені середовища) буде переміщуватися у вигляді тонкої цівки без перемішування (досліди англійського фізика О. Рейнольдса, 1883 р). Іншими словами при ламінарному

режимі всі частинки рідини або газу мають лише поздовжню складову швидкості.

При збільшенні швидкості руху потоку на підфарбований, тому добре видимий спочатку прямолінійну цівку починають накладатися хвилі. Причини появи цих хвиль є різні збурення, що накладаються на потік. Це можуть бути збурення, що виникли за рахунок витікання води з резервуару, витікаючої з скляної трубки підфарбованої рідини, збурення, що виникли за рахунок вібрації споруд під час руху транспорту, та навіть через не плавність входу в води в трубку. Остання причина зазвичай буває домінуючою. Поступово разом зі зростанням швидкості води число таких хвиль та їх амплітуда зростають, поки, нарешті, цівка не розіб'ється на нерегулярні та перемішані між собою більш дрібні струмені, хаотичний характер яких дозволяє зробити висновок про перехід ламінарного руху в турбулентний. Останнє відбувається в результаті втрати стійкості ламінарного руху, при цьому випадкові збурення, які спочатку викликали лише коливання струменів навколо їх стійкого прямолінійного ламінарного руху, швидко розвиваються і призводять до нової форми руху рідини – турбулентному. Таким чином турбулентний режим руху характеризується як неупорядкована течія з наявністю випадкових поперечних і поздовжніх пульсацій швидкості та перемішуванням середовища.

Між ламінарним і турбулентним режимами руху знаходиться перехідна область, яка характеризується випадковою зміною, чередуванням в просторі та в часі двох описаних раніше режимів течії.

Перехід від ламінарного режиму до перехідної області і, далі, до турбулентного режиму руху, спостерігається при певній швидкості руху рідини. Ця швидкість називається критичною $W_{кр}$.

Значення цієї швидкості прямо пропорційно кінематичної в'язкості рідини і обернено пропорційно діаметру труби.

$$W_{кр} = \frac{\nu}{d} k$$

де ν - кінематична в'язкість, м²/с;

k - безрозмірний коефіцієнт, однаковий для всіх рідин і газів, а також для будь-яких діаметрів та геометричних розмірів каналів (труб). Цей коефіцієнт називається критичним числом Рейнольдса $Re_{кр}$;

d - внутрішній діаметр каналу (труби), м.

Візуальне (якісне) визначення режиму течії є неточним і не завжди можливим. Тому про режим течії роблять висновки по кількісній характеристиці – числі (критерії) Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{w \cdot d}{\nu},$$

де w – середня швидкість руху середовища в каналі, м / с;

d – визначний геометричний розмір, м;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;

ρ – густина, кг/м³.

З погляду на фізичні властивості число Re є міра відношення сил інерції до сил в'язкості в потоці.

Встановлено, що в круглих трубах при $Re_{кр} < 2300$ має місце стійкий ламінарний режим течії, при $Re_{кр} > 10000$ – стійкий турбулентний режим течії. В інтервалі $2300 < Re_{кр} < 10000$ рух нестійкий (перехідна область).

Вказане значення $Re_{кр} \approx 2300$ є умовним. Наявність різних збурень, обумовлених змінами швидкості потоку за величиною чи напрямом, може істотно знижувати величину $Re_{кр}$. Критичне значення $Re_{кр}$ зменшується і при неізотермічності потоку по перетину труби через виникнення конвективних потоків рідини в напрямку, перпендикулярному до осі труби.

1.3 Опис експериментальної установки

Схема експериментальної установки для визначення режиму течії води наведена на рисунку 1.1[1]. Установка складається з напірної ємності 2, скляної трубки 9, крана 10, мірної ємності 12, ємності 6 з підфарбованою рідиною.

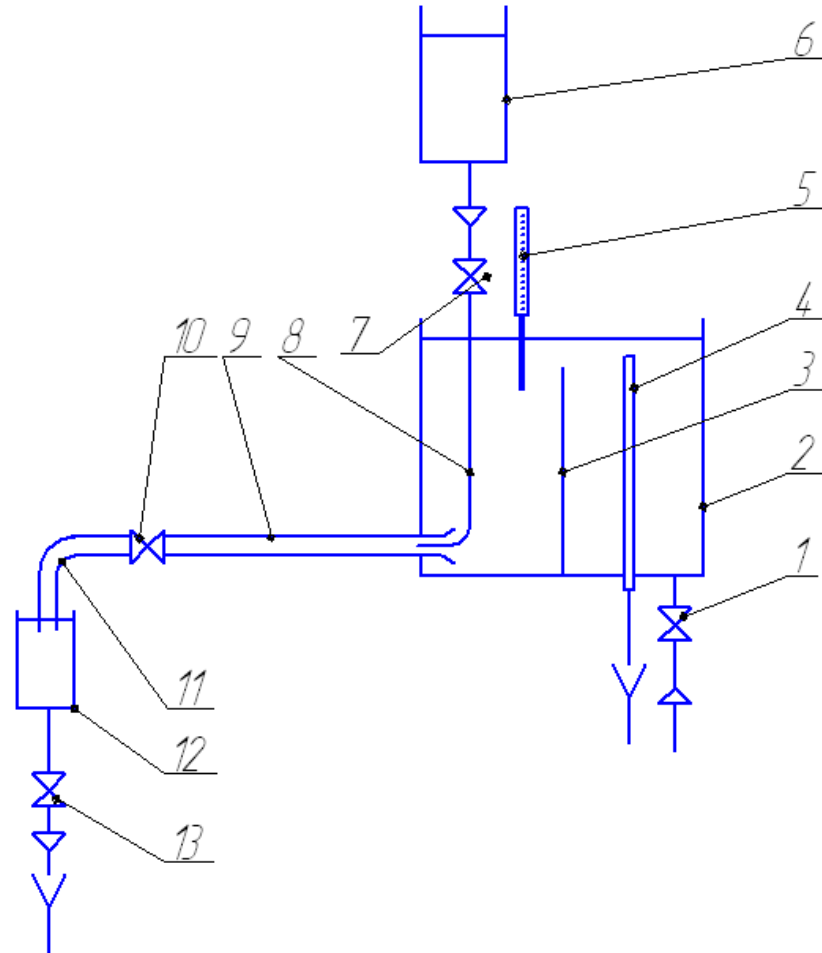


Рисунок 1.1 – Схема експериментальної установки

Вода через вентиль 1 по трубопроводу підводиться до напірної ємності 2. В середині напірної ємності 2 встановлено зливну трубу та перегородку 3 для підтримання постійного рівня води. Температура води вимірюється термометром 5.

З напірної ємності 2 вода подається до скляної трубки 9. Внутрішній діаметр трубки 21 мм. Вхідний кінець цієї трубки виконано у вигляді розтруба з закругленими краями, що дозволяє забезпечити плавний вхід води до трубки.

Регулювання швидкості руху рідини по трубці 9 забезпечується краном 10. Далі вода через зливну трубку 11 подається до мірної ємності 12, звідки через кран 13 вода відводиться до каналізації. Об'єм рідини, що витекла під час експерименту до мірної ємності 12 визначається по мірній лінійці.

З ємності 6 підфарбована рідина через тонку трубку 8 подається на вхід до скляної трубки 9. Швидкість витікання підфарбованої рідини регулюється краном 7.

1.4 Методика проведення експерименту

Експеримент слід проводити наступним чином.

1. Відкривається кран 1 і ємність 2 наповнюється водою.
2. Відкривається кран 10 і в столярній трубці 9 створюється потік води з мінімальними витратами. В цей час кран 13 знаходиться у положенні «ВІДКРИТО».
3. Відкривається кран 7 і до потоку вводиться цівка підкрашеної води.
4. Спостерігається режим руху рідини в трубці 9. Проводиться фотофіксація результатів спостережень. Закривається кран 13 та секундоміром фіксується час наповнення мірної ємності 12 і кількість води V , що натікла до мірної ємності 12. Результати вимірювань заносяться до таблиці 1.1– результатів вимірювань. Результати фотофіксації заносяться до таблиці 1.2, **на фотокартці обов'язково вказується дата та час проведення експерименту**. Після кожного заміру відкривається кран 13, вода з мірної ємності 12 зливається до каналізації.
5. Аналогічно проводиться 5...6 дослідів, поступово збільшуючи витрати води за допомогою крану 10. Візуально визначається початок встановлення перехідної області руху рідини та початок турбулізації потоку. Витрати через рідини в трубці 9 збільшуються до максимуму. Проводиться фотофіксація результатів спостережень та фіксується час наповнення мірної ємності 12 і

кількість води, що натікла до мірної ємності 12. Результати вимірювань заносяться до таблиці результатів вимірювань.

6. Після досягнень максимальних витрат через кран 10 в трубці 9 витрати поступово зменшуються за допомогою крану 10 та проводиться іще 5...6 дослідів аналогічно пп. 4 та 5.

7. Досліди закінчуються закриванням кранів 1 та 10 і відкриванням крану 13.

1.5 Обробка результатів експериментів

Обробка результатів кожного досвіду зводиться до визначення числа Рейнольдса Re за рівнянням 1. У нашому випадку (труба круглого перетину) під d (визначний геометричний розмір) необхідно розуміти внутрішній діаметр трубки, а чисельне значення кінематичного коефіцієнта в'язкості води ν необхідно вибирати за довідковими даними при температурі t . Результати розрахунків заносяться до таблиці 1.2.

Середня швидкість руху води визначається за виразом, м/с:

$$w = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot d^2 \cdot \tau}$$

де заміряний за час τ об'єм води V в ємності 12 наводиться в m^3 .

Таблиця 1.1 – Результати експериментів

№ дослідів	Об'єм води V, m^3	Час τ, c	Якісна характеристика потоку
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Таблиця 1.2 – Результати розрахунків

№ дослідів	Швидкість руху води, w , м/с	Значення числа Рейнольдса Re	Режим руху	Результати фотофіксації
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Теплофізичні властивості води:

– густина, кг/м^3 : $\rho_g = 1000 - 0,062 \cdot t - 0,00355 \cdot t^2$;

– коефіцієнт динамічної в'язкості, $\text{Па}\cdot\text{с}$: $\mu_g = 0,59849(43,252 + t)^{-1,5423}$

– коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\text{м}^2\cdot\text{с}$:

$$\nu_g = 2 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-8} \cdot t + 6 \cdot 10^{-10} \cdot t^2 - 3 \cdot 10^{-12} \cdot t^3$$

1.6 Контрольні запитання

1. Які існують режими течії рідини?
2. Назвіть характерні риси режимів течії рідини.
3. У чому полягає фізичний зміст критерію Рейнольдса?
4. Як якісно визначається режим течії рідини? Проілюструйте відповідь фотографіями з протоколу.
5. Як кількісно визначається режим течії рідини?
6. Назвіть критичне значення критерію Рейнольдса.
7. Навіщо потрібно знати режим течії рідини?

8. Отта схему експериментальної установки.
9. Як в даній роботі визначається середня швидкість руху води?

1.7 Перелік посилань

1. Павлищев М.И./ Методические указания к проведению НИРС по курсу «процессы и аппараты химической технологии» – «Определение режима течения жидкости». Для студетов специальностей 0803, 0805, 0807, 0834, 0904. Киев., КПИ, 1982. – 8с.

2. Процеси та обладнання хімічної технології [Текст]: підруч. У 2 ч./ Я.М. Корнієнко, Ю.Ю. Лукач, І.О. Мікульонок, В.Л. Ракицький, Г.Л.Рябцев. К.: НТУУ "КПІ", 2011. – Ч. 1. – 300 с.

3. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии.М., 1973, 750 с.

4. Конспект лекцій з дисципліни «Пічне обладнання у хімічних процесах» для студентів напряму 6.050503 «Машинобудування» [Електронний ресурс] / НТУУ «КПІ» ; уклад. А. Р. Степанюк. – Електронні текстові данні (1 файл: 2,32 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 132 с. – Назва з екрана. – Доступ : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/15245>. Свідоцтво ІХФ № 05/06-1.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ ЦИКЛОНУ

2.1 Вступ

У всіх технологічних процесах для забезпечення протікання процесів необхідно забезпечувати певні витрати компонентів через апарати (циклони, центрифуги, ректифікаційні колони, теплообмінники, тощо) [1]. Величина гідродинамічного опору апарата впливає на енергетичні витрати для проведення процесів.

Оскільки основні розміри апарата і оптимальний режим його експлуатації визначаються з техноологічних залежностей, необхідно мати залежності для визначення гідравлічного опору апарату.

МЕТА РОБОТИ: практичне ознайомлення з роботою циклону, визначення за експериментальними даними значення коефіцієнта гідравлічного опору циклону та порівняння його з літературними даними.

ЗАВДАННЯ:

1. Дослідити роботу циклону.
2. Визначити гідравлічний опір циклону.

Лабораторна робота проводиться на стенді, розробленому авторами методичних вказівок [2].

2.2 Теоретична частина

Очищення промислових пилогазових потоків від зважених в них твердих частинок пилу може здійснюватися шляхом осадження твердих частинок під дією різних сил: тяжіння, відцентрових, електростатичних, акустичних, тощо. Одним з найбільш простих і широко розповсюджених способів очищення неоднорідних пилогазових систем є відцентрове розділення неоднорідних систем. Як апарат-пиловловлювач, в яких можна здійснити таке розділення, використовуються циклони різних конструкцій [1...7].

Існує велика кількість різноманітних конструкцій циклонів. Класифікація циклонів за конструктивними ознаками наведена на рисунку 2.1.

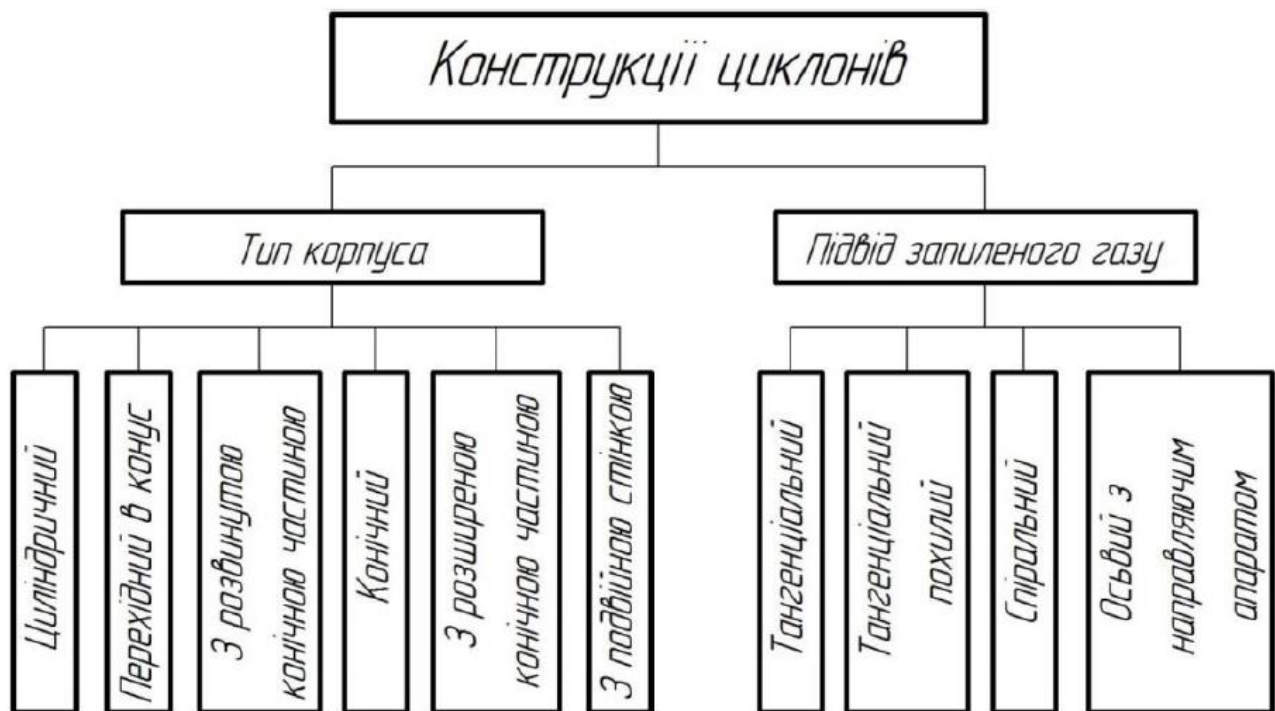


Рисунок 2.1 – Класифікація циклонів

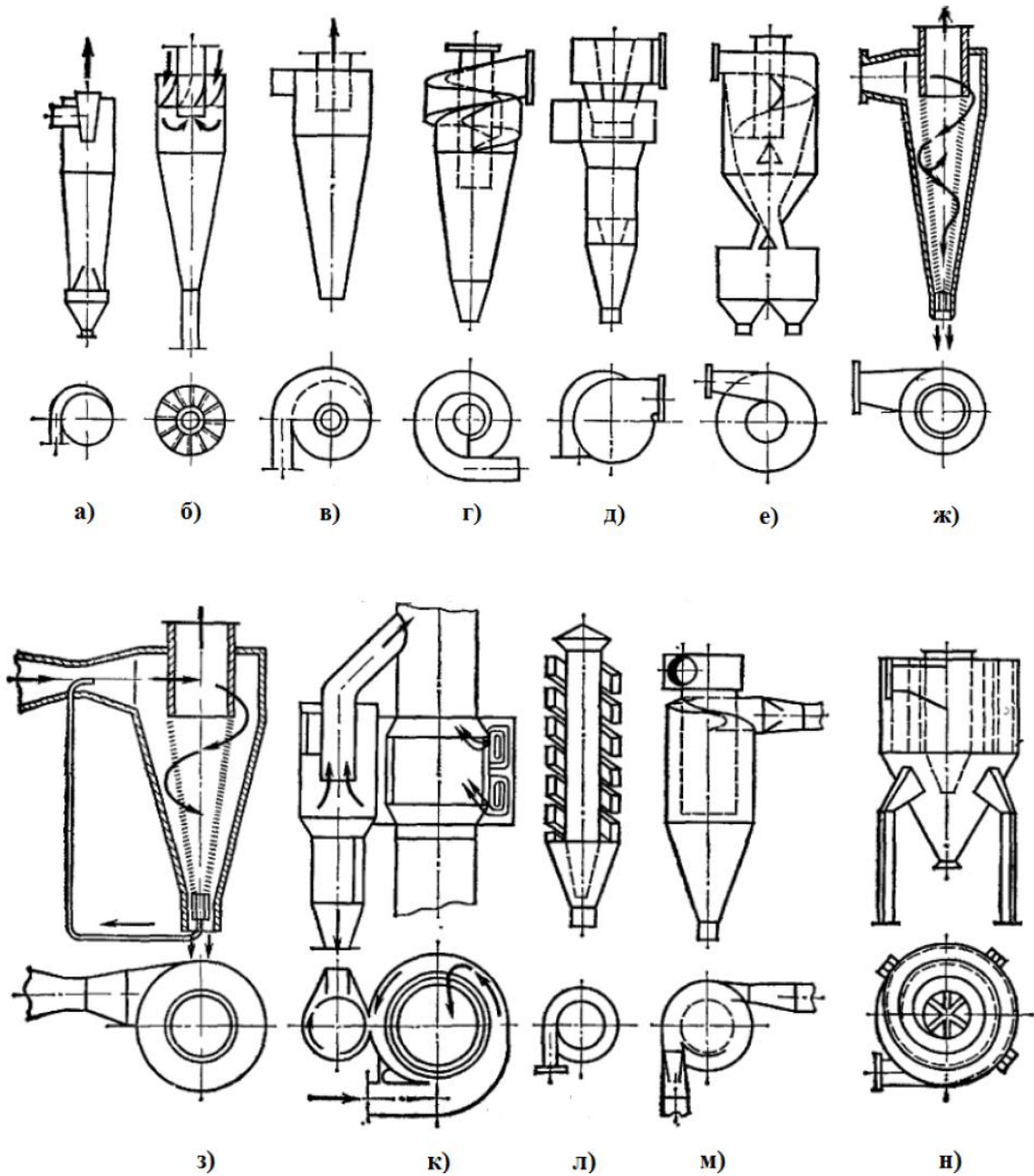
В якості апаратів – пилоуловлювачів, в яких можна здійснити цей спосіб, використовують так звані циклони різних конструкцій (рисунок 2.2).

Найбільшо поширення набули циклони конструкції НДІОГАЗ типу НДІОгазу ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24. Цифрове позначення циклону відповідає куту α нахилу кришки апарату і патрубку, що підводить запылений потік. Вони використовуються для сухого очищення газових потоків від твердих частинок, що генеруються у багатьох технологічних процесах (наприклад, в процесі сушки сипучих твердих матеріалів, випалу, агломерації, спалювання палива, тощо), а також для очищення аспіраційно відведених з місць підвищеної запыленості повітря в різних галузях промисловості.

До недоліків циклонів можна віднести те, що їх не можна використовувати для вловлювання пилу, який легко агломується або коагулюється.

Залежно від вимог, що пред'являються до очищення газів, циклони можуть мати самостійне застосування або використовуватися в якості апарату першої

ступені очищення в поєднанні з іншими газоочисними апаратами (наприклад, електрофільтрами, рукавними фільтрами або апаратами мокрого очищення).



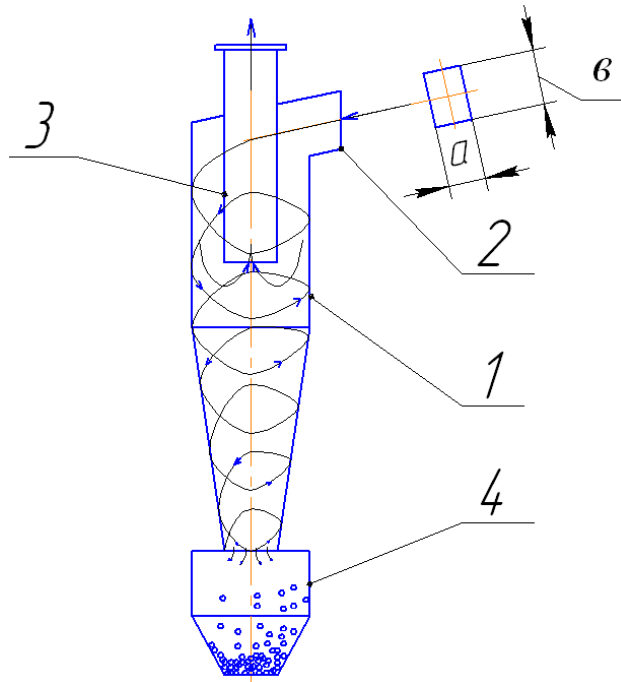
а, б – циклони ЧССР; в – циклон Мельстроля; г – циклон типу СВКЦН;
 д – циклон Давідсона; е – циклон з подвійною стінкою; ж – циклон з перфорованою вихлопною трубою; з – циклон з рециркуляцією; к – подвійний циклон; л – циклон Сиркіна; м – циклон ЛІОТ; н – циклон Полізіуса.

Рисунок 2.2 – Конструкції циклонів

Процес розділення неоднорідних систем газ-тверді частинки під дією відцентрових сил обумовлюється різницею густини газового потоку і твердих частинок, що знаходяться в обертовому русі. Відцентрові сили, що виникають

при цьому, забезпечують більшу ефективність процесу в порівнянні з процесом розділення, що протікає лише сил тяжіння (гравітації).

На рисунку 2.3 зображено принципову схему роботи циклону типу ЦН.



1 - корпус циклону; 2 - вхідний патрубок; 3 - вихлопна труба;

4 - бункер (збірник уловлених твердих частинок)

Рисунок 2.3 – Принципова схема роботи циклону ЦН

Запилений повітря входить в циклон 1 через тангенціально вбудований патрубок 2 під певним кутом до корпусу циклону і, набуваючи обертальний рух, опускається спіралеподібно вниз, вздовж внутрішньої поверхні стінок спочатку циліндричної а, далі, конічної частин корпусу апарата. Обертаючись спочатку в кільцевому просторі, який утворено циліндричною частиною корпусу циклону і вихлопною трубою 3, а потім в коніній зоні, розташованій нижче торця вихлопної труби, газовий потік утворює вихор, що обертається. При цьому розвиваються центробіжні сили, під дією яких тверді частинки, що знаходяться в газовому потоці і мають значно більшу густину, ніж газ, відкидаються до стінок корпусу циклону. Рух твердих частинок по внутрішній поверхні циклону до бункера 4 обумовлено не тільки впливом сили тяжіння, а й впливом сили тиску газового потоку, який направлено донизу. Досягнувши нижнього торця конічної частини корпусу циклону, тверді частинки надходять в

бункер. У конічної частини корпусу циклону газовий потік починає змінювати напрямок і переміщуватися вгору до вихлопної труби, утворюють внутрішній вихор. Звільнений від твердих частинок газовий потік потрапляє до вихлопної труби 3 і, піднімаючись по ній гвинтоподібно вгору, видаляється з циклону.

Оптимальне значення швидкості газу на вході в апарат, забезпечують високий ступінь очищення пилогазового потоку, визначається в кожному конкретному випадку індивідуально, з урахуванням властивостей неоднорідних систем, що розділюються (наприклад, фракційний склад твердої фази, здатність до агломерації та коагуляції та інших факторів) і його аеродинамічного опору.

Загальна аеродинамічний (гідравлічний) опір циклону складається з втрат на в'язкісне тертя і на подолання місцевих опорів:

$$\Delta P_{\text{ц}} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4$$

де ΔP_1 – гідравлічний опір входу в циклон, Па; ΔP_2 – гідравлічний опір тертя шарів газу по стінці апарату, Па; ΔP_3 – гідравлічний опір, що створюється під час переходу середовища з зовнішньої зони до внутрішньої зони (у вихлопну трубу) з поворотом на 180° , Па; ΔP_4 – гідравлічний опір тертя шарів газу між собою у внутрішній спіралі та по стінці вихлопної труби, Па.

Виражаючи загальний гідравлічний опір через динамічний тиск у вхідному патрубку і замінюючи суми місцевих коефіцієнтів гідравлічних опорів загальним коефіцієнтом гідравлічного опору циклону $\xi_{\text{ц}}$, отримаємо:

$$\Delta P = \xi_{\text{ц}} \frac{\rho \cdot w_{\phi}^2}{2}$$

$$w_{\phi} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2}$$

де ρ – густина газового середовища в робочих умовах, кг/м^3 ; w_{ϕ} – фіктивна швидкість газу, віднесена до повного поперечного перерізу циліндричної частини апарату, м/с ; V – витрати газового потоку через циклон, $\text{м}^3/\text{с}$; D – діаметр циклону, м.

Значення коефіцієнтів гідравлічного опору входу циклону $\xi_{\text{ц}}^{\text{вх}}$ та коефіцієнтів гідравлічного опору всього циклону $\xi_{\text{ц}}$ залежить від

конструктивних особливостей циклонів. Наприклад, для деяких стандартних циклонів, розроблених головним підприємством “НИИОГАЗа”, вони мають наступні значення (Таблиця 2.1).

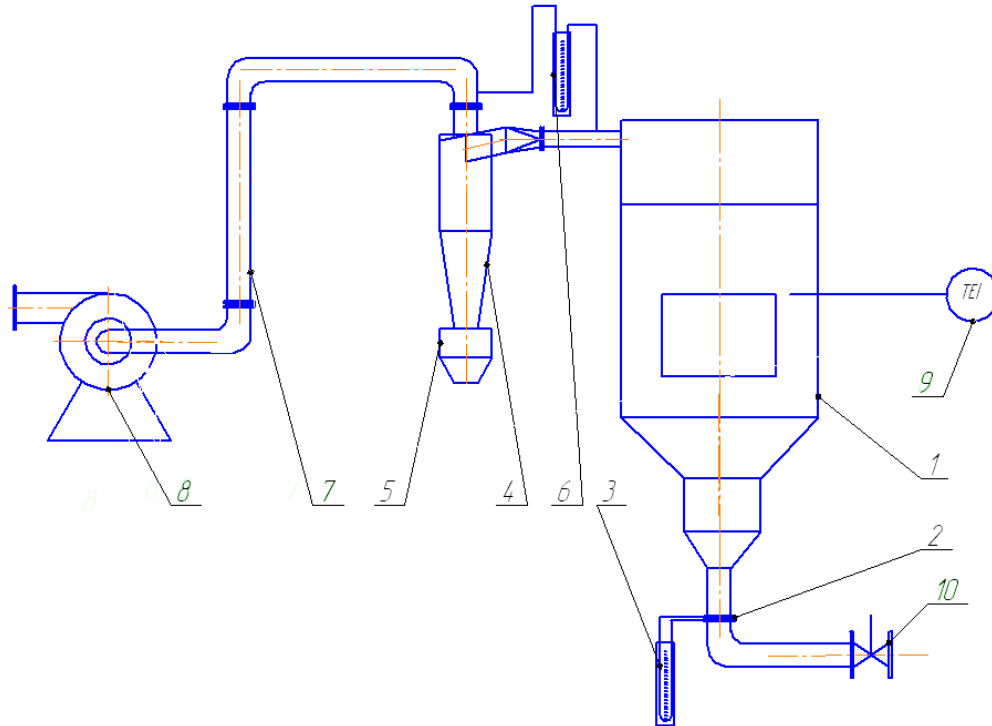
Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнтів гідравлічного опору входу циклону

Тип циклонів	ξ_{ζ}^{ex}	ξ_{ζ}^{ex}
ЦН-15	3,0	105
ЦН-11	2,7	180
ЦН-24	4,8	60

2.3 Опис експериментальної установки

Експериментальна установка базується на лабораторному стенді «Дослідження процесу грануляції багатокомпонентних сумішей» [8].

Установка для дослідження гідравлічного опору циклону складається з гранулятора 1, в якому зневоднюються багатокомпонентні розчини, що містяться аморфні складові. На лінії подічі повітря до гранулятора встановлено витратомірну шайбу 2 та диференційний манометр 3 – для визначення витрат повітря. З гранулятора 1 запилене повітря подається до циклону 4, типу ЦН-15, виготовлений зі сталі (рисунок 2.4), знизу якого приєднано бункер 5. Гідравлічний опір циклону вимірюється диференційним манометром 6, трубки заміру якого встановлено на вході і виході з циклону. Розташовані в трубопроводах Г-подібні трубок, що приєднані до диференційного манометра виконано поворотними, щоб уникнути попадання в них пилу під час вимірювань. Для подачі в циклон повітря використовується водокільцевий насос 7. Температура вимірюється за допомогою термопари 9, та ПК з програмним забезпеченням на базі “LabView”. Регулювання витрат газу через циклон проводиться за допомогою шибера вентиля 10.



- 1 – гранулятор; 2 – діафрагма; 3, 6 – диференційний манометр; 4 – циклон;
 5 – бункер циклона; 7 – повітропровід; 8 – водокільцевий насос; 9 – термопара;
 10 – вентиль

Рисунок 2.4 – Схема установки

2.4 Техніка безпеки

Перед вмиканням необхідно:

1. Провести огляд стенду з метою виявлення видимих пошкоджень обладнання.
2. Перевірити наявність заземлення.
3. Перевірити положення всіх вентилів та перемикачів і встановити їх у положення, що відповідає початку роботи на установці.
4. Роботу проводити тільки за інструкцією.
5. При виконанні роботи бути уважними: забороняється доторкатися до елементів конструкції, що обертаються та класти на них будь-які предмети.

6. В разі будь-яких неполадок в роботі, студентам забороняється намагатися усувати їх самостійно.

2.5 Методика проведення роботи

Експерименти виконують після видалення очищення апаратів та трубопроводів від твердих частинок на незапиленому повітрі.

1. Проводяться заміри розмірів вхідного патрубку та діаметру циклону та куту нахилу вхідного патрубка.

- Діаметр циклона, $D =$ _____ м.
- Висота вхідного патрубку циклона, $a =$ _____ м.
- Ширина вхідного патрубку циклона, $b =$ _____ м.
- Кут нахилу вхідного патрубка $\alpha =$ _____ °.

2. Навчально-допоміжним персоналом вмикається водокільцевий насос.

3. Проводиться вимірювання температури у апараті термопарою 9.

4. Вентильом 8 встановлюються мінімальні витрати повітря. Показники диференційних манометрів 3 та 6 знімаються при встановлених витратах повітря одночасно по команді «відлік».

5. Витрати повітря збільшуються від мінімуму до максимуму, та виконується 10...12 замірів показників диференційних манометрів.

6. Результати заносяться у таблицю 2.2

Таблиця 2.2 – Дослідження коефіцієнтів гідравлічного опору циклону

№ з/п	Показники диференційного манометра, встановленого на витратомірній шайбі, $P_{вир}$ ММ ВОД. СТ.	Продуктивність V , м ³ /с	Показники диференційного манометра, встановленого на циклоні, $P_{вир}$ ММ ВОД. СТ.	Коефіцієнт гідравлічного опору циклону ξ_{ζ}	Коефіцієнт гідравлічного опору для входу циклону ξ_{ζ}^{ex}
1					
2					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

2.6 Обробка результатів експериментів

Після проведення експериментів виконуються наступні розрахунки та заносяться до таблиці 2.2:

1. Визначаються витрати повітря (V , м³/с) за градувальним графіком диференційного манометра 3.

2. Розраховується фіктивна швидкість газового потоку у вхідному патрубку циклону за виразом:

$$w_{ex} = \frac{V}{a \cdot b},$$

де – a і b висота та ширина вхідного патрутка циклона, м.

3. Розраховується фіктивна швидкість газу, віднесена до повного поперечного перерізу циліндричної частини апарату:

$$w_{ex} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2},$$

де – D діаметр циклона, м.

4. Визначаються величини $\frac{\rho \cdot w_{ex}^2}{2}$ та $\frac{\rho \cdot w_{\phi}^2}{2}$, де $\rho = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{273}{273+t}$, кг/м³;

($M = 29$ кг/моль – молекулярна маса повітря, t – температура повітря у приміщенні).

5. Визначаються відповідні коефіцієнти гідравлічних опорів ξ_{cy}^{ex} та ξ_{cy} .

Для знаходження значення коефіцієнту гідравлічного опору входу циклону ξ_{cy}^{ex} у

програмі Microsoft Excel будується таблиця залежності $\Delta P_{cy}^{ex} = f_{cy}^{ex} \left(\frac{\rho \cdot (w_{cy}^{ex})^2}{2} \right)$, для

чого у закладці “Вставка” необхідно вибрати тип діаграми “Точечная” (Рисунок 2.5). На полі діаграми необхідно правою клавішею:

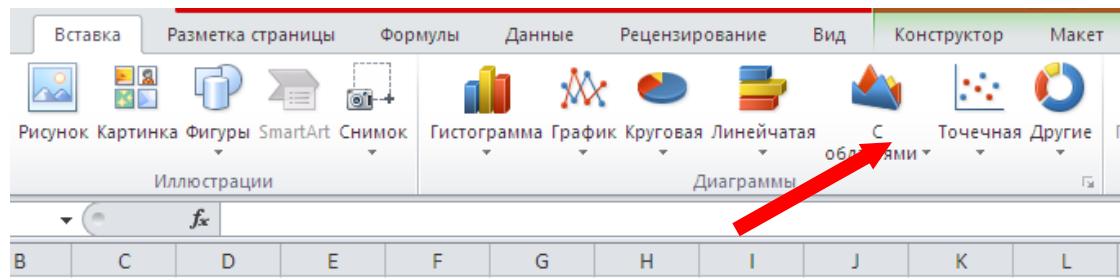


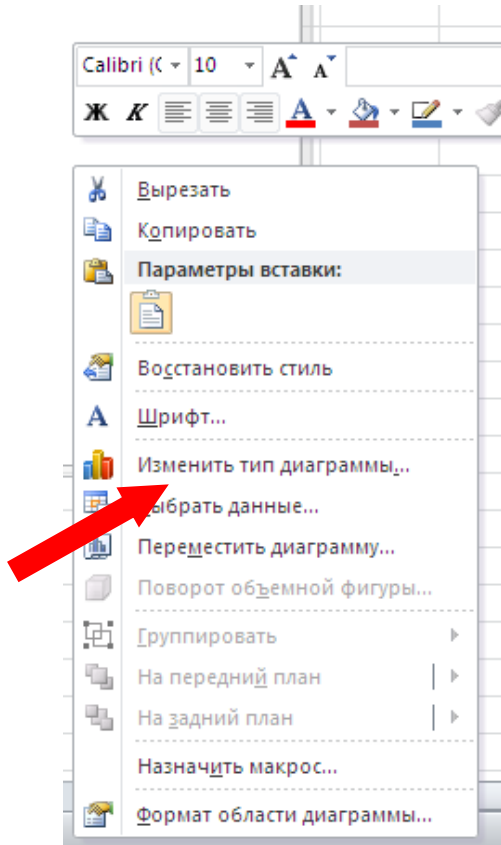
Рисунок 2.5 – Вибір типу діаграми

«мишки» вибрати з випадаючого меню пункт “Выбрать данные” (рисунок 2.6, а), у полі “Выбор источника данных” натиснути па закладку “Добавить” (рисунок 2.6, б) та у поля “Значения X” і “Значения Y” вписати область звідки необхідно брати данні або вибрати їх «мишкою», (рисунок 2.6, в). Як вісь абсцис вибирається значення $\frac{\rho \cdot w_{\phi}^2}{2}$, як ординат відповідно – ΔP .

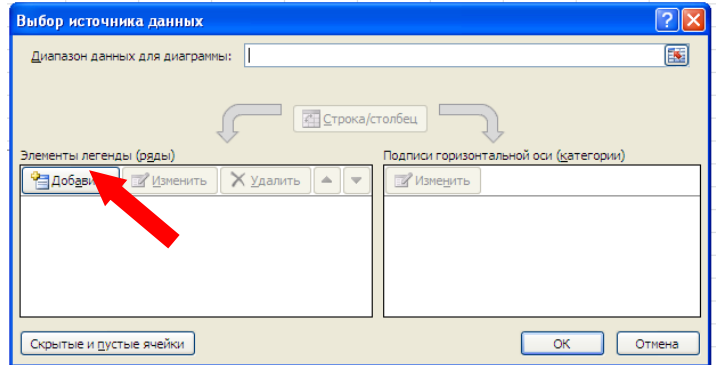
Після побудови графіка необхідно виконати апроксимацію отриманої функції. Виділити правою клавішею “мишки” криву, що описує залежність

$$\Delta P_u^{ex} = f_u^{ex} \left(\frac{\rho \cdot (w_u^{ex})^2}{2} \right)$$

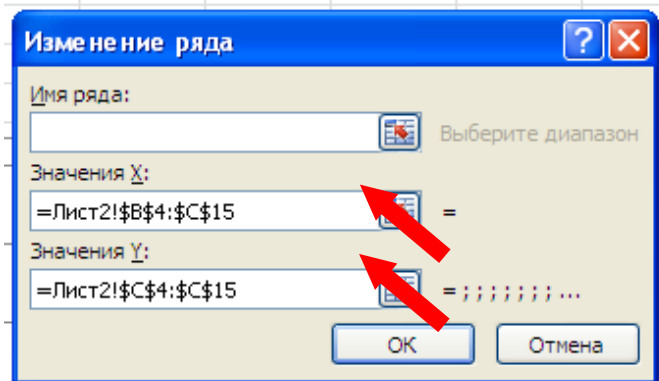
та вибрати закладку “Добавить линию тренда”, у цій закладці



а)



б)



в)

Рисунок 2.6 – Вибір області даних для побудови графіка $\Delta P_u^{ex} = f_u^{ex} \left(\frac{\rho \cdot (w_u^{ex})^2}{2} \right)$

зробити три позначки на полі “Параметры линии тренда” – “Линейная”, “показывать уравнение на диаграмме” та “поместить на диаграмму величину достоверности аппроксимации (R^2)” (Рисунок 2.7). З рівняння апроксимації, отримуємо величину коефіцієнт гідравлічного опору всього циклону ξ_u . Аналогічно знаходиться коефіцієнт гідравлічного опору всього циклону ξ_u .

Всі величини, виміряні в процесі експериментів і отримані після розрахунків занести до таблиці 2.2. Виконати порівняння отриманих результатів

з табличними.

Провести аналіз отриманих результатів та зробити висновки за результатами досліджень.

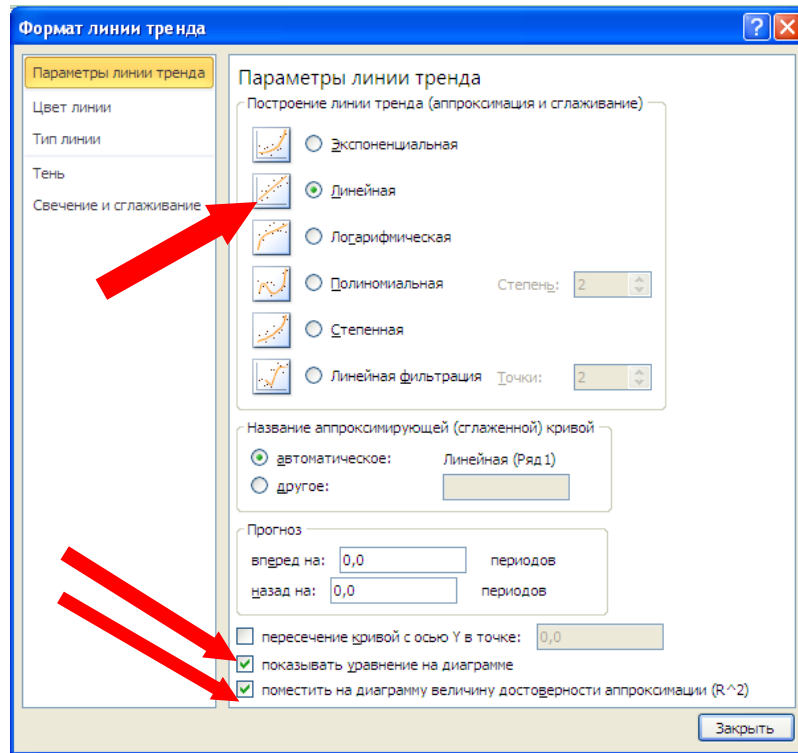


Рисунок 2.7 – Побудова апроксимуючої лінії

2.7 Контрольні запитання

1. Опишіть конструкцію циклону?
2. Як впливають діаметр циклону на швидкість газового потоку на його гідравлічний опір?
3. Що розуміється під гідравлічним опором циклону, як він озраховується?
4. Які чинники впливають на гідравлічним опором циклону?
5. Як розрахувати коефіцієнт гідравлічного опору циклону та коефіцієнт гідравлічного опору для входу циклону?
6. Чим відрізняються коефіцієнт гідравлічного опору циклону та коефіцієнт гідравлічного опору для входу циклону?

7. Математично обґрунтуйте використання диференційного манометра.

8. З яких елементів складається стендова установка (основні вузли і контрольно-вимірювальні прилади)?

Теплофізичні властивості сухого повітря [7]:

– густина, кг/м³: $\rho_n = 1,29281 - 4,782143 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,797631 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$

– коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с:

$$\nu_n = (13,45 + 0,07810715 \cdot t + 1,321419 \cdot 10^{-4} \cdot t^2) \cdot 10^{-6}$$

2.8 Перелік посилань

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1973.-752с.

2. Розин Р., Раммлер Е., “Воздушные сепараторы и их работа”. – “Энергетическое обозрение (теплотехнический выпуск)”, 1963, №8. –

3. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Башта Т.М. и др. – М.: Машиновстроение, 1982. – 423 с.

4. Циклоны НИИОгаз. Руководство по проектированию, изготовлению, монтажу, эксплуатации”, 1954.

5. Справочник по пыле- и золоулавливанию / Под. ред. А.А. Русанова. – М., “Энергоатомиздат”, 1983.

6. Страус В., “Промышленная очистка газов”. – М., “Химия”, 1980.

7. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков В.Н. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

8. Процес одержання мінерально – гумінових твердих композитів [Електронний ресурс]: <http://сі.kpi.ua/uk/> монографія для студентів, які навчаються за напрямком “Машинобудування” спеціальність “Обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів” / НТУУ “КПІ”; уклад. Я.М.Корнієнко, А.Р.Степанюк. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2013. – 137с.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ НАСАДКОВИХ КОЛОН

3.1 Вступ

У багатьох технологічних процесах (ректифікація, абсорбція, охолодження і зволоження промислових газів, виробництво ізотопів та речовин високої чистоти) для забезпечення якісного протікання процесів необхідно забезпечувати певні витрати компонентів (газів, рідин, парів, тощо).

При русі потоків газу (пари) та рідини через колони виникають гідродинамічні опори тертю та втрати, що викликані місцевими опорами. Величина гідродинамічних опорів та втрат напору контактних пристроїв апаратів впливають на енергетичні витрати для проведення процесів.

Оскільки основні розміри апарата і оптимальний режим його експлуатації визначаються з гідравлічних залежностей, треба вивчити гідродинамічні процеси в апараті.

Розглядаючи питання гідродинаміки в колонах із насадкою, слід мати на увазі, що узагальнення по насадковим колонам у відомих монографіях [1...6] відносяться в основному до крупних насадок з розмірами елементів більш 10 мм і не можуть бути розповсюджені на маломасштабні колони із високоефективними дрібними насадками через емпіричний характер відомих кореляцій.

Метою даної лабораторної роботи є експериментальне дослідження закономірностей впливу швидкості газу на гідравлічний опір дрібної сухої насадки та порівняння отриманих експериментальних даних із результатами розрахунків за теоретичними формулами та даними інших авторів.

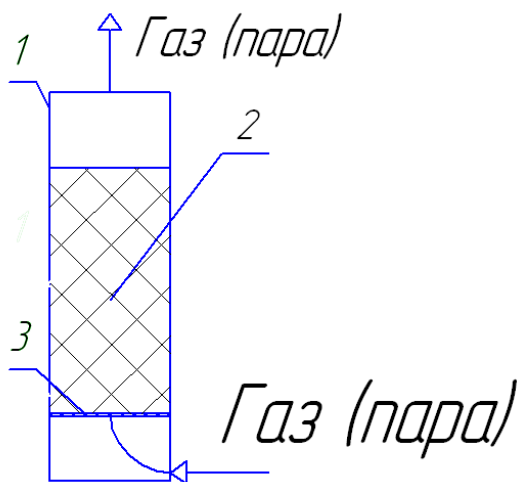
При складанні методичних вказівок використано матеріали методичних вказівок [1].

3.2 Теоретичні відомості

Насадкові колони – це циліндричні апарати, наповнені тим чи іншим видом насадки, потрібної для збільшення поверхні фазового контакту і зміни гідродинаміки потоків останніх [2, 3]. Схему насадкової колони наведено на рисунку 3.1.

Корпус насадкової колони 1 виконується у вигляді циліндру, у нижній частині якого встановлена опорна (колосникова) решітка 3. На решітку насипом або правильними рядами вкладають насадку 2. У нижній частині апарата розташовано штуцер для подачі газу, штуцери для відведення газу розташовано у верхній частині апарата.

Опорні решітки. Насадку, і в першу чергу насипну, вкладають на опорну решітку (колосники), яка повинна мати невеликий гідравлічний опір і достатні механічну міцність і жорсткість, щоб витримати вагу насадки й рідини, що утримується насадкою (рисунок 3.2). Найчастіше опорні решітки виготовляють із вертикально розташованих штаб (полос), між якими встановлюють дистанційні втулки. Складену решітку стягують шпильками. Решітки більших розмірів виконують з кількох секцій, які вкладають на опорні балки.



1 – корпус; 2 – насадка; 3 – опорна решітка

Рисунок 3.1 – Схема насадкової колони із суцільним завантаженням

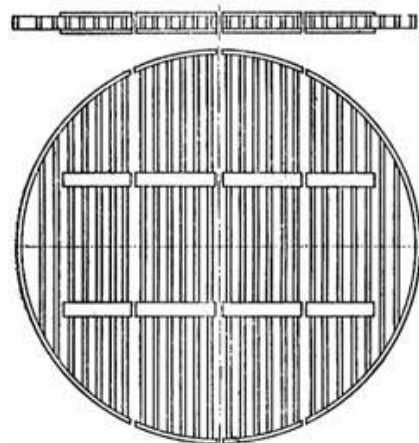


Рисунок 3.2 – Опорна решітка

Решітки малих апаратів часто виготовляють суцільнозварними. Іноді для колон малого діаметра опорні решітки виготовляють з просічно-витяжного листа. Просвіт між штабами решітки повинен бути не більше 0,6–0,7 від найменшого розміру елемента насадок.

Насадки. Насадки є контактним елементом насадкової колони, від якого залежить ефективність роботи апарата. У колонних апаратах застосовується велика кількість різноманітних насадок, найпоширеніші з яких зображено на рисунку 3.3.

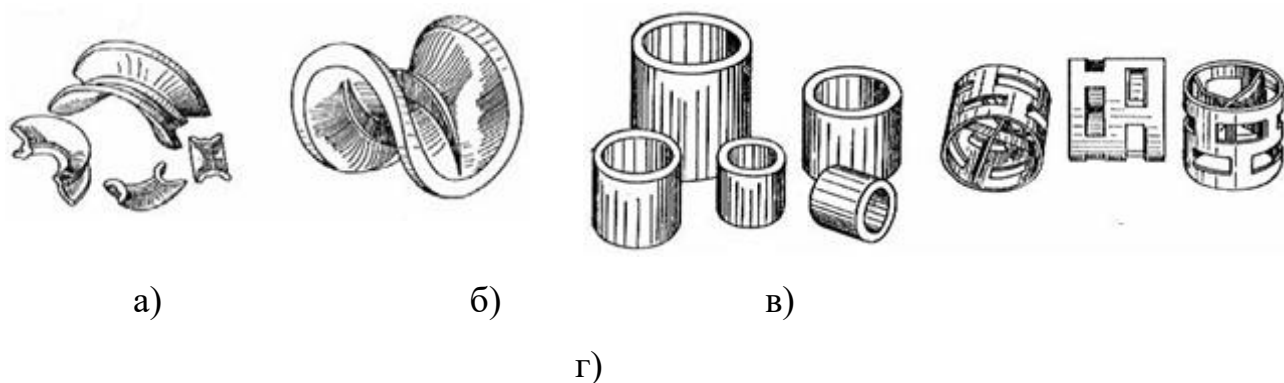


Рисунок 3.3 – Типи насадок

- а) –кільця Рашига; б) – кільця Палля; в) – сідла «Інталлокс»;
г) –сідла Берля

Як дрібну насадку для заповнення маломаштабних колон використовують елементи різної форми розміром 1,5 – 5 мм. Такі насадки характеризуються сильно розвиненою поверхнею та капілярними властивостями, що сприяє більш повному змочуванню насадки і забезпечує високу ефективність розділення. Отримали використання дрібні насадки, головним чином у формі сідел, кілець, одно- та багатовиткових відрізків спіралі. Поодинокі металеві та скляні витки були впроваджені у практику Фенске. Достатньо ефективною є спіральнопризматична насадка запропонована Левінім. Характеристику насадок наведено в літературі [2...4].

Різнманітність насадок, які використовуються, пояснюється вимогами, що висуваються до них. Насадки мають бути з: великою питомою поверхнею й великим вільним об'ємом; малою насипною вагою; малим гідравлічним опором

паровому (газовому) потоку; гарним змочуванням рідиною, що обробляється; рівномірним розподілом фаз за перерізом колони; механічною міцністю, жорсткістю й хімічною стійкістю в робочому середовищі; низькою вартістю.

Насадки характеризують за наступними параметрами:

1) питома поверхня f (в $\text{м}^2/\text{м}^3$), тобто поверхня одиниці об'єму насадки; ця величина показує, яка поверхня насадки заповнює 1 м^3 простору;

2) вільний об'єм V_f , (в $\text{м}^3/\text{м}^3$), тобто об'єм порожнин в одиниці об'єму, заповненому насадкою, ця величина показує, який об'єм лишається незаповненим на 1 м^3 простору, заповненого насадкою;

3) маса 1 м^3 насадки, кг;

4) кількість елементів насадки в одиниці об'єму насадки n , шт/ м^3 ;

5) насипна густина ρ_n , тобто маса одиниці об'єму насадки, кг/ м^3 ;

6) еквівалентний діаметр елемента насадки d_e , м;

Гідродинамічні режими насадкових колон

У насадкових апаратах газ рухається по порожнинах між насадкою, в залежності від швидкості газового потоку можливі різні гідродинамічні режими: ламінарний, проміжний, турбулентний [6...7].

Завданням гідравлічного розрахунку насадкового апарата є визначення гідравлічного опору апарата P , тобто величини втрати тиску газу (пари), зв'язаної з проходженням середовища через апарат. Дані гідравлічних розрахунків – дуже істотні фактори для оцінки реальності конструкції апаратів та встановлення оптимальних умов їх роботи.

Гідравлічний опір апаратів визначається швидкістю газу та конструкцією насадки.

Для розрахунку гідравлічного опору апарата визначають опір сухої насадки. Гідравлічний опір сухої насадки, не зрошеної рідиною, розраховують за рівнянням [1 – 7], Па

$$\Delta P'_{\text{сух}} = \xi_0 \frac{w_{\phi}^2 \cdot \rho_2 \cdot f \cdot h_n}{8 \cdot V_f^3},$$

де ξ_0 – коефіцієнт гідравлічного опору сухої насадки; w_{ϕ} – швидкість руху газу, віднесена до всього перерізу апарата (приведена швидкість), м/с; ρ_2 – густина газу, кг/м³; f – питома поверхня насадки, м²/м³; h_n – висота шару насадки, м; V_f – вільний об'єм насадки, м³/м³.

Приведена швидкість газу, м/с

$$w_{\phi} = \frac{V_2}{S},$$

де V_2 – об'ємні витрати газу, м³/с; S – площа перерізу колони, м². Коефіцієнт гідравлічного розрахунку ξ_0 залежить від типу насадки та режиму протікання газу. У спеціально поставлених дослідах із дрібною насадкою [2], були отриманні рівняння, які дають залежність між коефіцієнтами тертя сухої насадки та значеннями критерію Рейнольдса :

для області $Re_2 < 80$

$$\xi_0 = \frac{400}{Re_2^{0,85}},$$

для області $80 < Re_2 < 400$

$$\xi_0 = \frac{70}{Re_2^{0,45}},$$

для області $Re_2 > 400$

$$\xi_0 = \frac{16,5}{Re_2^{0,2}},$$

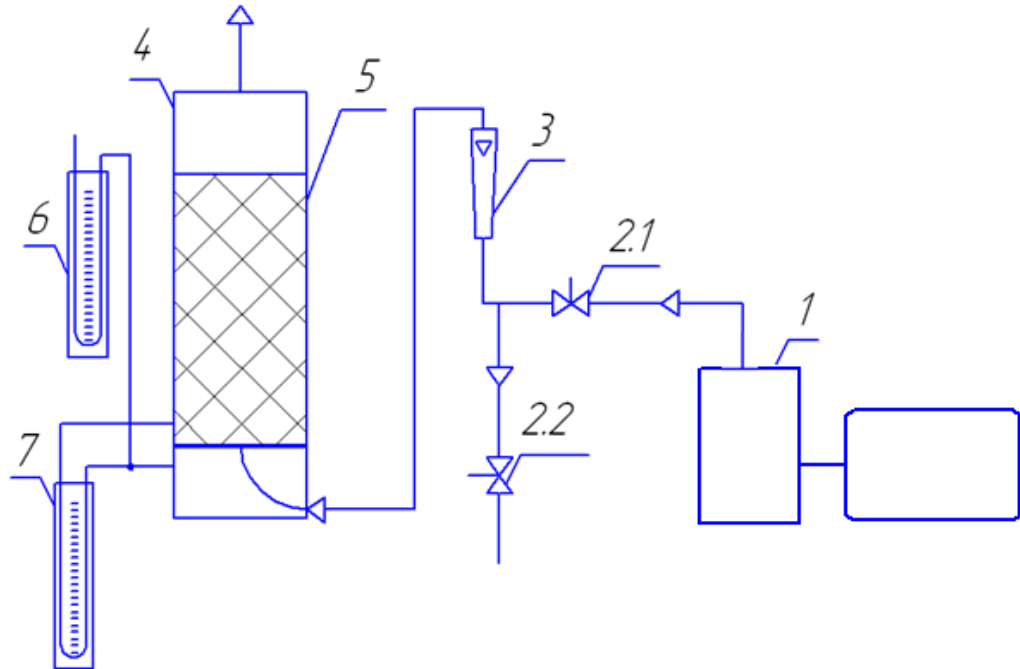
де Re_2 – критерій Рейнольдса для газової фази.

Критерій Рейнольдса для газової фази розраховується за виразом:

$$Re_2 = \frac{4 \cdot w_{\phi} \cdot \rho_2}{f \cdot \mu_2},$$

3.3 Схема дослідної установки

Дослідна установка (рисунок 3.4) складається з насадкової колони 4 до якої подається повітря за допомогою компресора 1 через регулюючий вентиль 2.1. Контроль витрат повітря здійснюється ротаметром 3.



1 – компресор; 2.1, 2.2 – запірні крани; 3 – ротаметр;
4 – насадкова колона; 6, 7 – дифманометри; 5 – насадка

Рисунок 4 – Принципова схема установки

Гідравлічний опір опорної решітки визначається за допомогою дифманометра 6. Гідравлічний опір сухої насадки – за допомогою дифманометрів 6 та 7.

Технічна характеристика установки:

Робочий тиск у колоні p , МПа	0,1
Розміри колони:	
– внутрішній діаметр $D_{\text{вн}}$, мм	95
– площа поперечного перерізу S , м ²	$7,085 \cdot 10^{-3}$

Характеристика насадки:

– матеріал кераміка	
– еквівалентний діаметр $d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon}{q}$, мм	4,16·10 ⁻³
– вільний об'єм насадки ε , м ³ /м ³	0,52
– питома поверхня f , м ² /м ³	499
– висота насадки h_n , мм	450

3.4 Техніка безпеки

На установці можуть працювати особи, які вивчили будову і роботу установки, техніку безпеки (про що розписалися у відповідній документації), отримали інструктаж та дозвіл викладача.

Перед початком роботи перевірити заземлення (занулення), балон (виконується зав. лабораторіями, навчальним майстром або лаборантом); перевірити положення усіх кранів (вентилів) установки – нормальне положення – закриті.

Забороняється включати установку за наявності несправностей, або невиконаних регламентних робіт.

Забороняється різко відкривати крани, особливо крани газового балона.

Забороняється залишати установку, що працює, без догляду.

У разі виникнення аварійної ситуації необхідно спочатку припинити подачу повітря (закрити кран на редукторі).

3.5 Методика проведення експериментів

Підготовка установки до роботи

Увімкнути освітлення приладів.

Поставити двоходовий кран П.1 в положення “гідродинаміка”.

Відкрити повітряний кран верхньої головки мірного скла.

Дослідження гідравлічного опору сухої насадки

Підключити дифманометр 6 до штуцерів газорозподільної решітки "b" та "c", штуцер "a" – відкритий (положення 2.1).

Увімкнути компресор, по ротаметру 3 регулюючим вентилям 2.1 встановити задані витрати повітря (від 10 до 90 поділок з кроком 5 – 10 поділок). По тарувальному графіку встановити відповідність поділок витратам (u м³/с).

За допомогою дифманометра 6 виміряти гідравлічний опір газорозподільної решітки P_{resh} .

Переключити дифманометр 6 зі штуцера "b" до штуцера "a" верхньої точки колони. При цьому штуцери "b" та "d" з'єднують між собою (положення 2.2).

При тих самих витратах повітря заміряти сумарний (решітка + насадка) гідравлічний опір $\Delta P_{сум}$ за допомогою дифманометра 2.

Результати вимірів занести до таблиці 3.1.

Примітка: після кожних 2 – 3 вимірів необхідно закрити вентиль 2.1 та переконатись, що дифманометр установлюється на "0".

Таблиця 3.1 – Таблиця даних експериментів на сухій насадці

Результати експериментів					Результати розрахунків				
№ досліду	Витрати повітря, V_2		Гідравлічний опір, мм. вод. ст.		Гідравлічний опір сухої насадки $\Delta P_{сух}$		Швидкість газу w_ϕ	Re_2	ξ'_2
	Поділок	м ³ /с	ΔP_{resh}	$\Delta P_{сум}$	мм вод. ст.	Па	м/с		

Зупинити установку.

Вимкнути компресор. Закрити вентиль 2.1 подачі повітря.

Вимкнути освітлення приладів.

3.6 Аналіз та обробка результатів досліджень

За даними дослідів (таблиця 3.1) розрахувати:

Емпіричний гідравлічний опір сухої насадки, мм вод. ст., Па

$$P_{сух} = P_{сум} - P_{реш}$$

Приведену швидкість повітря w_{ϕ} (у м/с) за виразом $w_{\phi} = \frac{V_2}{S}$.

Критерій Рейнольдса Re_2 для газової фази.

Коефіцієнт опору сухої насадки ξ_0 , в залежності від області Re_2 .

Розрахунковий гідравлічний опір $\Delta P'_{сух}$ сухої насадки, Па.

Результати розрахунків занести до таблиці 3.1.

Побудувати графіки залежності гідравлічного опору сухої насадки $\Delta P_{сух}$ та $\Delta P'_{сух}$ від приведеної швидкості газу w_{ϕ} .

Побудувати в графік (в логарифмічній сітці координат) залежності коефіцієнту опору сухої насадки ξ_0 від критерію Рейнольдса Re_r .

На основі отриманих дослідних даних знайти вираз для коефіцієнта гідравлічного опору даної сухої насадки, розрахувавши константи "C" та "m" у рівнянні вигляду: $\xi'_0 = \frac{C}{Re_2^m} = C \cdot Re_2^{-m}$.

Коефіцієнт гідравлічного опору даної сухої насадки ξ'_0 може бути визначеним графічним шляхом з відношення:

$$C = \xi'_0 \cdot Re_2^m \quad K = \frac{\tau}{j^n}$$

Показник степені m визначається, як $1 - tg\alpha$, де α – кут нахилу кривої, до горизонталі в логарифмічних координатах (рисунок 3.5):

$$m = 1 - \operatorname{tg} \alpha = 1 - \frac{\ln \xi'_{01} - \ln \xi'_{02}}{\ln \operatorname{Re}_{e2} - \ln \operatorname{Re}_{e1}}$$

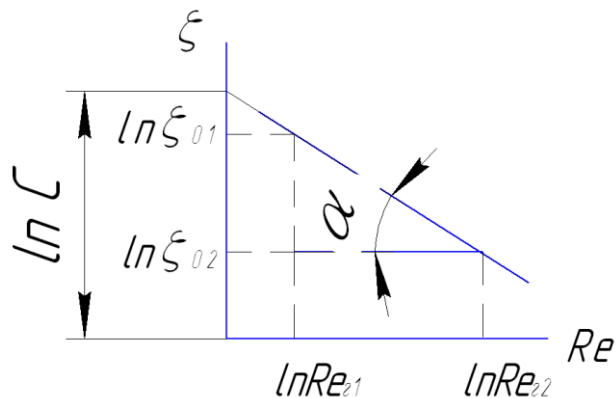


Рисунок 3.5 – До визначення констант "C" та "m"

На рисунку 3.5 показано графічне визначення констант "C" та "m". Більш точно константи "C" та "m" можуть бути визначені по методу найменших квадратів на ПК.

Порівняти та пояснити отримані результати.

Теплофізичні властивості сухого повітря [7]:

– густина, кг/м^3 : $\rho_n = 1,29281 - 4,782143 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,797631 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$

– теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$: $C_{p,n} = 1005,952 - 1,285717 \cdot 10^{-4} \cdot t + 3,33332 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$

– теплопровідність,

$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$: $\lambda_n = 2,436667 \cdot 10^{-2} + 7,78571 \cdot 10^{-5} \cdot t - 2,379922 \cdot 10^{-8} \cdot t^2$

– коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\text{м}^2/\text{с}$:

$$\nu_n = (13,45 + 0,07810715 \cdot t + 1,321419 \cdot 10^{-4} \cdot t^2) \cdot 10^{-6}$$

3.7 Контрольні запитання

1. Проаналізувати поняття ламінарний режим руху.
2. Проаналізувати поняття перехідний режим руху.
3. Проаналізувати поняття турбулентний режим руху.

4. Проаналізувати поняття коефіцієнт опору сухої насадки.
5. Що таке приведена та дійсна швидкості газу?
6. Які фактори впливають на гідравлічний опір у насадковій колоні?
7. Які бувають типи насадок?
8. Які основні характеристики насадок?
9. Які основні вимоги висувають до насадок?

3.8 Перелік посилань

1. Ракицький В.Л. Дослідження гідравлічного опору насадкових колон. Методичні вказівки / Уклад. В.Л. Ракицький. – К.: НТУУ “КПІ”, 2008.–24с. (Повний текст, pdf, 0.65 Mb) <http://ci.kpi.ua/uk>.

2. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высшая шк., 1962. – 656 с.

3. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976. – 656 с.

4. Методические указания к проведению НИРС по курсу "Процессы и аппараты химической технологии" – Исследование гидравлического сопротивления насадочной колонны//Сост. Тананайко Ю.М. – К.: КПИ, 1981. – 15с.

5. Конспект лекцій з дисципліни «Пічне обладнання у хімічних процесах» для студентів напряму 6.050503 «Машинобудування» [Електронний ресурс] / НТУУ «КПІ» ; уклад. А. Р. Степанюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,32 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 132 с. – Назва з екрана. – Доступ : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/15245>. Свідоцтво ІХФ № 05/06-1.

6. Процеси первинної газо- нафтопереробки. Процеси первинної газо-нафтопереробки [Електронний ресурс] : навчальний посібник / НТУУ «КПІ» ; уклад. А. Р. Степанюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 291 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 126 с. – Назва з екрана. – Доступ: <http://ci.kpi.ua/metodopen> 126 с.

7. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков В.Н. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ МЕМБРАННИХ МОДУЛІВ

4.1 Вступ

В хімічній промисловості процеси розділення сумішей на компоненти мають надзвичайно важливе значення. Для здійснення процесів розділення рідких сумішей застосовують традиційні методи – перегонку, ректифікацію, екстракцію, адсорбцію тощо. Проте найбільш універсальним методом є розділення з використанням напівпроникних мембран (мембранні методи), які здобули поширення не лише в хімічній промисловості [1...7].

В хімічній і нафтохімічній промисловості мембранні методи застосовують для розділення азеотропних сумішей, очищенні і концентрування розчинів, очищення чи виділення високомолекулярних сполук з розчинів, що містять низькомолекулярні компоненти тощо. В біотехнології та медичній промисловості – для виділення і очищення біологічно активних речовин, вакцин, ферментів, тощо. В харчовій промисловості – для концентрування фруктових соків, молока, отримання високоякісного цукру тощо. Найбільш широкого застосування мембранні процеси знайшли при обробці води і водних розчинів, очищенню стічних вод.

Для баромембранних процесів рушійною силою є різниця тисків в напірному і дренажному каналах мембранного модуля (трансмембранний тиск). Величина робочого визначається опором мембрани, осмотичним тиском розчину, а також явищем концентраційної поляризації та її наслідками, зокрема у вигляді осадів. Однак напірні канали мембранних модулів мають невелику товщину (0,3-1 мм) і в них присутня сітка-сепаратор, що обумовлює суттєвий опір руху розділюваного розчину через мембранний модуль. Враховуючи, що довжина промислових мембранних модулів може досягати 1-1,5 м, а в одному апараті може групуватися декілька модулів. Тому втрати тиску по довжині апарата можуть суттєво впливати на процес і для їх врахування необхідно мати

надійні залежності.

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є експериментальне дослідження опору мембранного модуля.

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі задачі дослідження:

1. Експериментально визначити витрати рідини, що проходить через модуль.
2. Експериментально визначити перепад тиску на мембранному модулі.
3. Отримати артеріальне рівняння для визначення втрат тиску на мембранному модулі.

4.2 Теоретичні відомості

Основним елементом кожної мембранної установки є мембранний апарат, в якому розташований мембранний модуль. Найчастіше використовуються модулі спіральної конструкції (рисунок 4.1).

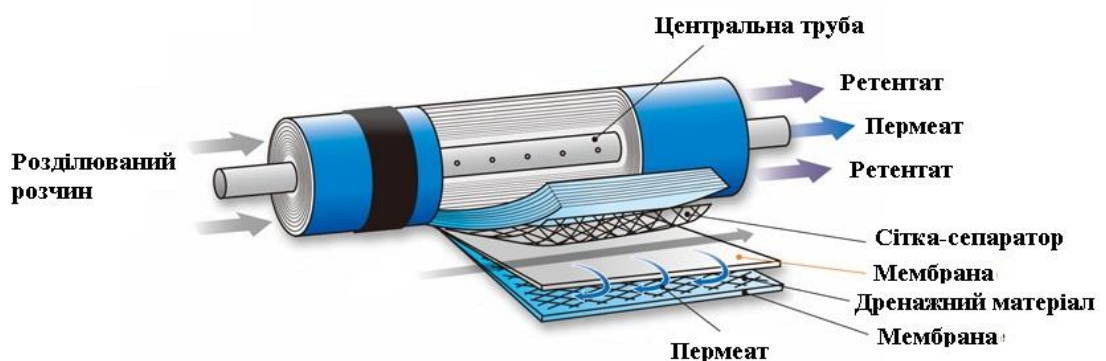


Рисунок 4.1 – Схема спірального мембранного модуля

Спіральні (або рулоновані, рулонні, сувійні) мембранні модулі (Spiral wound membrane modules) для зворотного осмосу набули найбільшого поширення в системах підготовки води через високу питому поверхню (300-

1000 м²/м³), малу матеріалоемність, відносну простоту в експлуатації [3,4].

В робочих умовах, розділюваний розчин подається через торець в напірні канали рулонованого модуля, частина розчину проходить крізь мембрану, утворюючи пермеат, потрапляє в центральну трубу і відводиться з апарату. Інша частина розчину рухається вздовж мембрани і виводиться з іншого торця модуля, утворюючи ретентат. В процесі мембранного розділення концентрація розчинених речовин в пермеаті зменшується, а в ретентаті зростає. Канали мембранного модуля утворюються сіткою-сепаратора, яка знаходиться між витками рулону.

Малі лабораторні спіральні модулі містять одиничний мембранний пакет, як показано на рисунку 1. Площа поверхні в таких модулях зазвичай становить 0,2–1,0 м². Промислові модулі містять декілька мембранних пакетів, кожен з площею в 1-2 м², загорнутих навколо центральної труби-колектора (рисунок 4.2) [4].

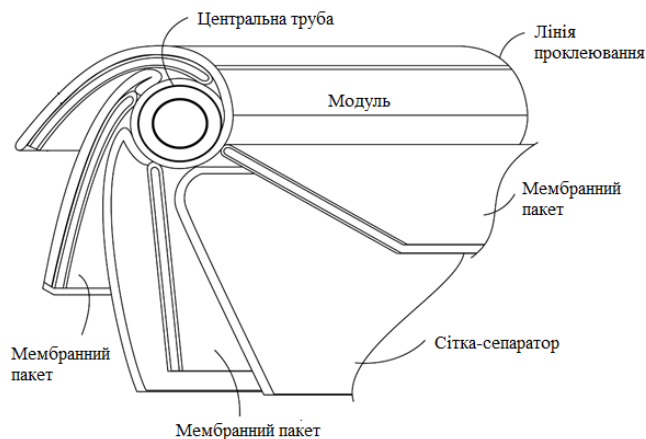


Рисунок 4.2 – Мультипакетний спіральний модуль

Мультипакетна конструкція мінімізує гідравлічний опір потоку пермеату, що рухається до центральної труби. Якщо одиничний пакет використовувати в мембранному модулі з великою поверхнею, то шлях, пермеат проходить до центральної труби становитиме декілька метрів, залежно від діаметра модуля. Такий довгий шлях пермеату буде причиняти значний гідравлічний опір в дренажному каналі. Використанням багатьох коротких пакетів гідравлічний опір

в кожному пакеті підтримується на контрольованому рівні. Стандартні промислові спіральні модулі мають діаметр 8 дюймів (203,2 мм) і довжиною 40 дюймів (1016 мм). 12-дюймові модулі (діаметр 304,8 мм) довжиною до 60 дюймів (1524 мм) були виготовлені і служать для економії масштабу. Існує тенденція до зростання діаметрів модулів для більших установок. Приблизні площі поверхні мембран та кількості мембранних пакетів, що використовуюються в промислових спіральних модулях довжиною 40 дюймів наведені в таблиці 4.1 [4].

Таблиця 4.1 – Типові параметри стандартних спіральних модулів

Діаметр модуля, дюйм	4	6	8	12
Кількість мембранних пакетів	4-6	6-10	15-30	30-40
Площа поверхні мембрани, м ²	3-6	6-12	20-40	30-60

Від чотирьох до шести мембранних модулів послідовно з'єднуються в одному корпусі. Зазвичай 8 дюймовий корпус, що містить 6 модулів має площу поверхні мембран 100-200 м². Корпус мембранного апарату з двома модулями показаний у розрізі на рисунку 4.3.

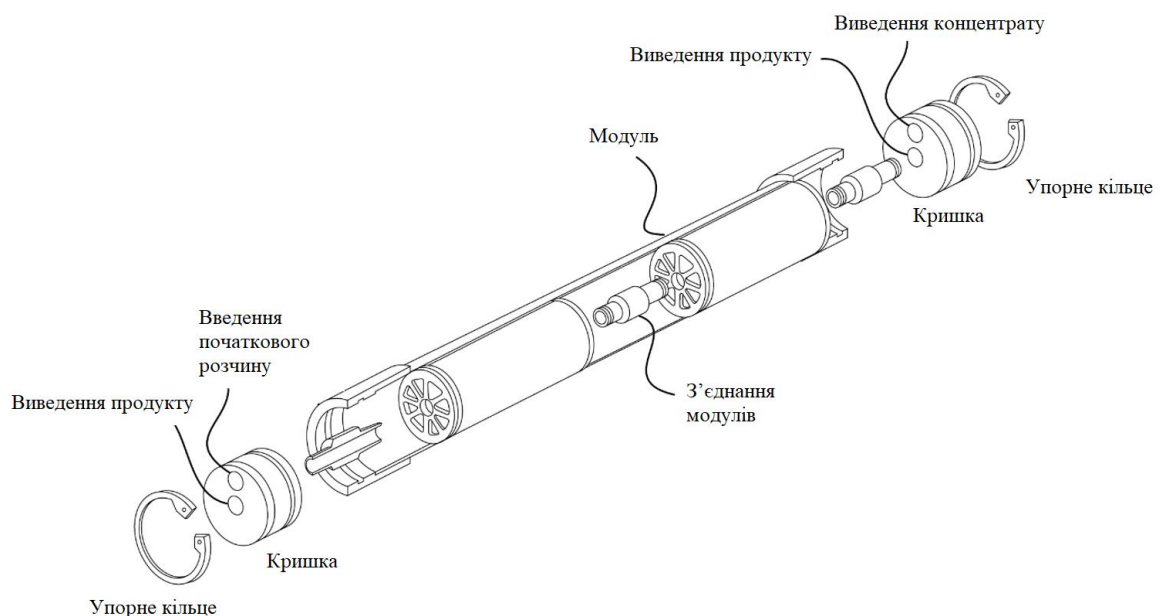


Рисунок 4.3 – Корпус зі спіральними мембранними модулями

На кінці кожного модуля закріплений антителескопічний пристрій (АТП), який сконструйований для уникнення пересування частин модуля під дією прикладеного тиску. АТП також приєднаний з гумовим ущільненням для формування вузького з'єднання між модулем та корпусом. Це ущільнення усуває байпас рідини в зазор між модулем і корпусом.

В даній роботі використовують побутові спіральні модулі типу TFC-75. Робоча поверхня мембранного модуля становить $F=0,46 \text{ м}^2$. Товщина сітки-сепаратора визначає висоту каналу, яка для розглядуваного типу мембран становить $\delta=0,35 \text{ мм}$. Довжина мембранного полотна становить $l=1,05 \text{ м}$.

В даній роботі розглядається опір руху рідини в напірному каналі мембранного модуля, а проникнення речовини через мембрану не враховується. Розділюваний розчин заходить в апарат через вхідний штуцер, потрапляє на торець модуля, проходить через модуль, виходить з іншого боку модуля, і далі поступає в наступний модуль апарата. Після виходу з останнього модуля сконцентрований розчин видаляється через відповідний штуцер. Для простоти в даній роботі буде використовуватися один модуль.

Опір руху рідини в модулі можна представити у вигляді:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho w^2}{2}$$

де w – швидкість руху рідини в каналі мембранного модуля, м/с; ρ – густина рідини, кг/м³; ξ – коефіцієнт гідравлічного опору.

Величина ξ , як правило, визначається експериментально. Однак визначене експериментальне значення для конкретного модуля не може бути використане не лише для модулів інших конструкцій, а й геометричних розмірів. Тому доцільно скористатися методами теорії подібності. Величина втрат тиску може визначитися з критерію Ейлера:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$$

Ця величина може бути представлена у вигляді залежності від критерію Рейнольдса:

$$Eu = f(Re)$$

де Re – критерій Рейнольдса, який визначається за формулою:

$$Re = \frac{wd_e}{\nu}$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, m^2/s ; d_e – визначальний розмір (еквівалентний діаметр), м.

Визначальним геометричним розміром в усіх критеріях подібності є той геометричний розмір, який найбільше впливає на процес. Для спіральних мембранних модулів за правилом гідравлічного діаметру еквівалентний діаметр прийнято визначати у вигляді [7]:

$$d_e = 2 \cdot \delta$$

де δ – товщина мембранного каналу, мм.

Товщина мембранного каналу визначається товщиною сітки сепаратора.

Функціональні залежності між критеріями подібності називаються критеріальними рівняннями. Найчастіше такі рівняння представляються у вигляді степеневих залежностей виду:

$$Eu = C Re^n$$

Коефіцієнти C та n знаходять апроксимацією експериментальних даних. Для цього зручно використовувати логарифмічну систему координат (рисунок 4.4).

Використання логарифмічної системи координат дозволяє лінеаризувати залежність $Eu = C Re^n$ і використати для знаходження коефіцієнтів C та n методів лінійної апроксимації, які набагато простіші, ніж у випадку степеневій апроксимації.

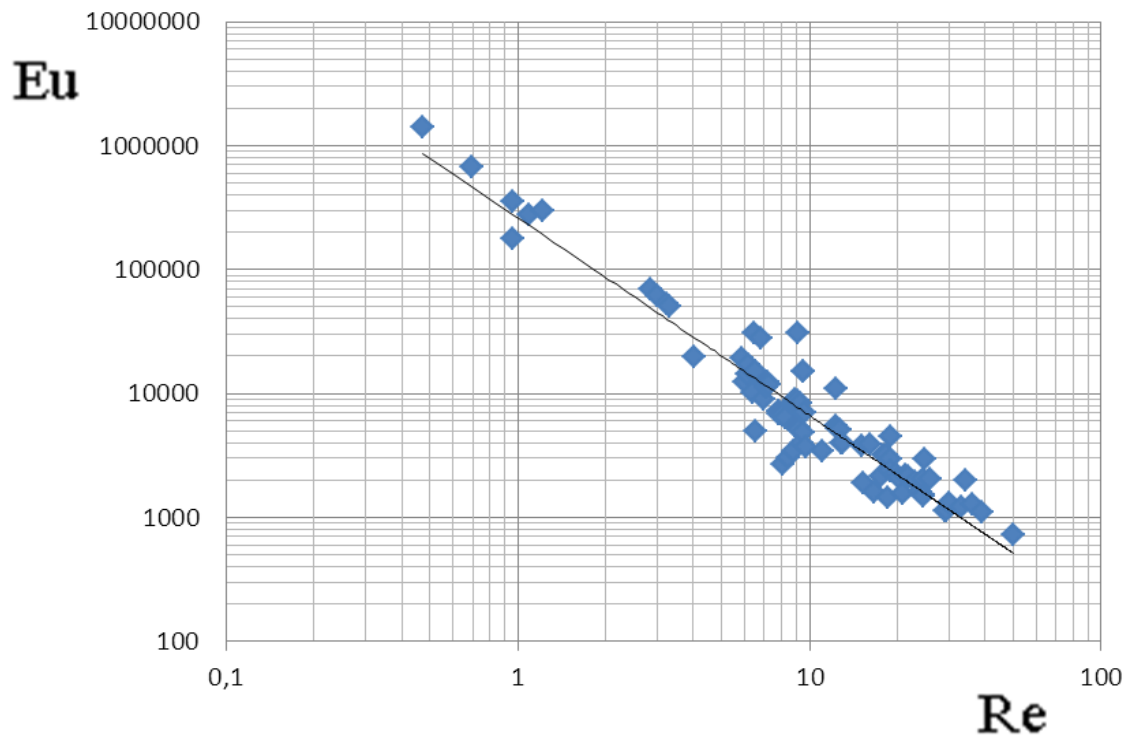
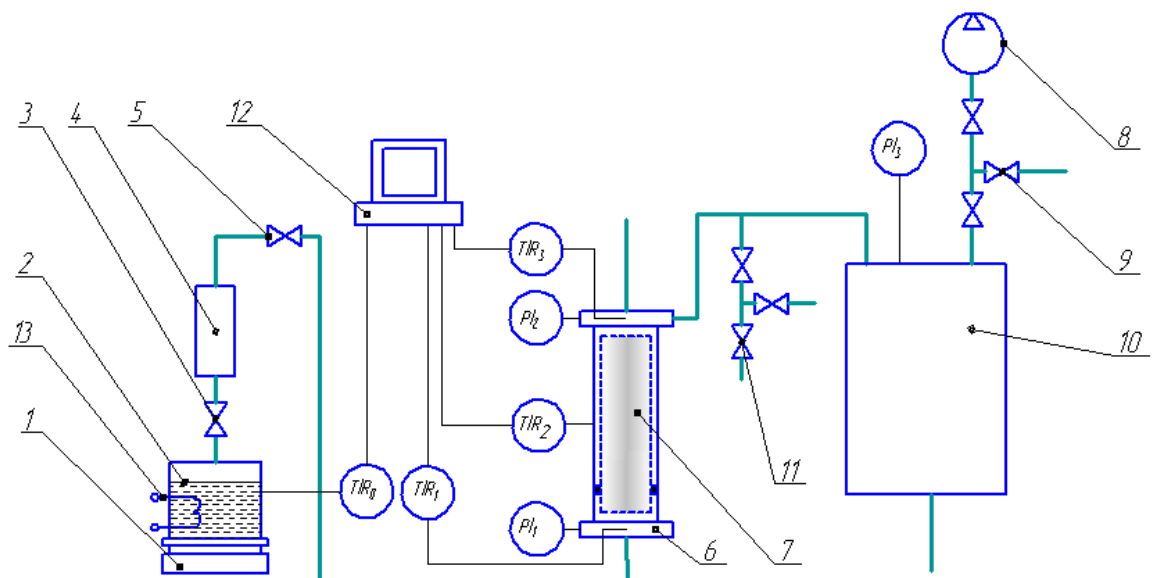


Рисунок 4.4 – Приклад графічної залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса в логарифмічній системі координат

4.3. Опис експериментальної установки

Схема експериментальної установки наведена на рисунку 4.5, а її загальний вигляд установки показаний на рисунку 4.6.

Установка дозволяє вимірювати витрату ваговим методом, для чого передбачені електронні ваги 1, які неперервно вимірюють масу промивного розчину в ємності 2 підігрітого до заданої температури з точністю 5 гр. Зміна маси за заданий проміжок часу вимірювалася за допомогою електронного секундоміра. Температура вимірюється блоком хромель-копелевих термопар, при чому температура вимірюється на вході в мембранний модуль 7 (TIR₁) та на виході з нього (TIR₃).

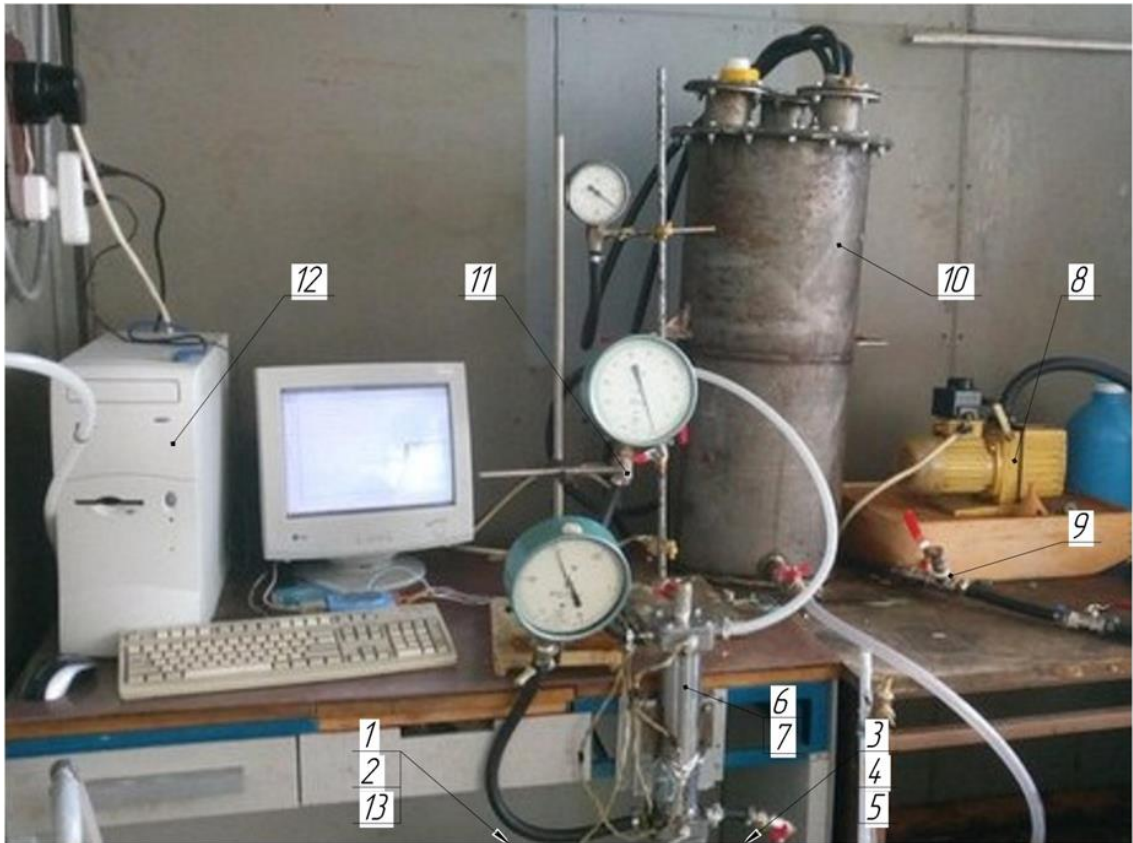


- 1 – ваги; 2 – ємність з промивним розчином; 3,5 – регулювальний кран;
 4 – ресивер; 6 – промивна камера; 7 – мембранний модуль; 8 – вакуум-насос;
 9 – кран з'єднання з атмосферою; 10 – проміжна ємність;
 11 – відбір проб промивного розчину, 12 персональний комп'ютер;
 13 – нагрівач.

Рисунок 4.5 – Схема експериментальної установки

Додатково передбачено вимірювання температури промивного розчину в ємності 1 (TIR_0) та зовнішньої поверхні експериментальної ємності 6 (TIR_2). Показники термопар реєструвалися на персональному комп'ютері 12 за допомогою програмного модуля IndexTem з частотою 1 вимір в секунду з точністю до 0,2 °С. Вимірювання тиску проводилося за допомогою вакуумметрів на вході в мембранний модуль 7 (PI_1), на виході з нього (PI_2) та в проміжній ємності 10 (PI_3).

Рух промивного розчину забезпечується перепадом тиску між ємністю 2 та ємністю 10, що створюється вакуум насосом 8. Також вакуум-насос 8 забезпечує розрідження, необхідне для реалізації можливості регенерації забруднених модулів, яке може здійснюватися на даній установці..



1 – ваги; 2 – ємність з промивним розчином; 3,5 – регулювальний кран;
 4 – ресивер; 6 – промивна камера; 7 – мембранний модуль; 8 – вакуум-насос;
 9 – кран з'єднання з атмосферою; 10 – проміжна ємність; 11 – відбір проб
 промивного розчину, 12 персональний комп'ютер;
 13 – нагрівач.

Рисунок 4.6 – Загальний вигляд експериментальної установки

Регулювання витрат промивного розчину здійснюється регулювальними кранами 3 та 5. Температура промивного розчину збільшувалася за допомогою електричного нагрівача 13.

4.4 Техніка безпеки

Основними факторами небезпеки при виконанні роботи є електричний, динамічний (надлишковий тиск) та хімічний. Додаткову небезпеку становить можливий контакт розчинів електролітів з електрообладнанням. Тому при виконанні роботи необхідно дотримуватися таких правил техніки безпеки:

1. Перед початком роботи перевірити наявність заземлення установки, герметичність захисного кожуха на електрообладнанні, відсутності рідин біля розеток.

2. Перед початком роботи перевірити справність кранів та герметичність з'єднань між шлангами та обладнанням, та роботу зливної системи.

3. Забороняється вмикати вакуум-насос при одночасному відкритті кранів 3, 9 та 11.

4. Не допускається перегрів вакуум-насоса.

5. Не дозволяється залишати працюючу установку без нагляду.

4.5 Методика проведення експериментів

Перед початком досліджень необхідно обнулити показники вагів 1, після чого встановити на них ємність 2, заповнено тестовою рідиною (водою). Вакуум-насос вмикається при закритих кранах 3, 9 та 11, до досягнення необхідного розрідження в ємності 10 (контролюється манометром PI_3). Після встановлення необхідних умов в системі, можна переходити до вимірювань опору.

Проводити експерименти необхідно проводити в такому порядку.

1. За допомогою крана 3 встановити необхідну витрату тестової рідини.

2. Виміряти витрату тестової рідини ваговим методом. Для цього необхідно зафіксувати показ вагів 1 в момент ввімкнення секундоміру (m_0) та після закінчення заданого проміжку часу Δt (m_1). Варто звернути увагу, що в процесі роботи маса тестової рідини в ємності 2 зменшується, тобто, по суті, фіксується зменшення маси рідини в ємності 2 за заданий проміжок часу.

3. Виміряти тиск на вході в мембранний модуль p_1 за допомогою манометра PI_1 та на виході з мембранного модуля p_2 за допомогою манометра PI_2 .

4. За допомогою вимірювального комплексу IndexTem виміряти температуру на вході в мембранний модуль t_1 та на виході з нього t_2 .

5. За допомогою крана 3 встановити інше значення витрат тестового розчину і повторити вимірювання згідно пунктів 2-4. Вимірювання провести на 6-10 різних значень витрат.

6. По закінченні роботи вимкнути вакуум-насос і відкрити кран 9.

7. Результати всіх вимірювань звести в таблицю (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Результати вимірювань

№ дослідів	Час Δt , с	Початкова маса рідини, m_0 , кг	Кінцева маса рідини, m_1 , кг	Тиск на вході в мембранний модуль, p_1 , МПа	Тиск на виході з мембранного модуля, p_2 , МПа	Температура на вході в мембранний модуль, t_1 , °С	Температура на виході з мембранного модуля, t_2 , °С

При вимірюванні тиску звернути увагу на одиниці вимірювань на манометрах.

4.6 Обробка результатів досліджень

За даними дослідів виконати розрахунки в такому порядку.

1. Визначити масову витрату тестової рідини, кг/с:

$$G = \frac{m_0 - m_1}{\Delta\tau}$$

2. Визначити приведену швидкість течії рідини в каналах мембранного модуля, м/с:

$$w = \frac{G}{\rho \cdot S}$$

де S – площа поперечного перерізу каналу мембрани, м, $S = \delta \cdot l$; ρ – густина тестової рідини (визначається залежно від температури).

3. Визначити гідравлічний опір мембранного модуля за результатами експериментів, Па (звернути увагу на розмірність):

$$\Delta p = p_1 - p_2$$

4. Визначити теоретичне значення гідравлічного опору мембранного модуля, Па:

$$\Delta p^T = \xi \frac{\rho w^2}{2}$$

Коефіцієнт опору прийняти в межах $\xi = 5-10$ [7].

5. Визначити критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{w d_e}{\nu}$$

6. Визначається критерій Ейлера:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$$

Результати розрахунків звести в таблицю 4.3.

7. Визначити коефіцієнти в рівнянні $Eu = C Re^n$ за методом найменших квадратів. Для цього, спершу, необхідно прологарифмувати цю формулу:

$$\lg(Eu) = \lg(C) + n \cdot \lg(Re)$$

Неважко бачити, що отримане рівняння є рівнянням прямої в логарифмічних координатах з кутовим коефіцієнтом n та вільним членом $B = \lg(C)$.

Для знаходження коефіцієнтів найбільш доцільним є метод найменших квадратів, якій полягає в такому [6]. Розраховуються значення логарифмів

модифікованого критерію Рейнольдса, $x_i = \lg(\text{Re})$, та модифікованого критерію Ейлера, $y_i = \lg(\text{Eu})$, а також значення x_i^2 та $x_i \cdot y_i$ і суми всіх величин – $\sum x_i$, $\sum y_i$, $\sum x_i^2$ та $\sum x_i \cdot y_i$. Всі результати зводяться в таблицю 4.4.

Таблиця 4.3 – Результати вимірювань

№ досліду	G , кг/с	w , м/с	Δp , Па	Δp^T , Па	Re	Eu

Таблиця 4.4 – Знаходження коефіцієнтів в критеріальному рівнянні аналітичним методом

№ пп	Re	Eu	$x_i = \lg(\text{Re})$,	$y_i = \lg(\text{Eu})$,	x_i^2	$x_i \cdot y_i$
Сума:						

Коефіцієнти регресії розраховуються за формулами:

$$m = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \right) - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$
$$B = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

Тоді значення константи C у рівнянні $Eu = CRe^n$ буде дорівнювати:

$$C = 10^B$$

Знайшовши ці величини, можна записати рівняння $Eu = CRe^n$ з числовими значеннями коефіцієнтів і використати його для розрахунку гідравлічного опору спіральних мембранних модулів.

4.7 Аналіз отриманих результатів та основні висновки

За результатами роботи побудувати графіки залежностей $\Delta p = f(w)$ та $\Delta p^T = f(w)$ в декартовій системі координат (доцільно зобразити два графіки в одній координатній системі), та графік залежності $Eu = f(Re)$ в логарифмічній системі координат.

Пояснити характер графіків.

Порівняти отримані експериментально значення гідравлічного опору мембранного модуля з результатами розрахунків та пояснити причини розбіжностей.

4.8 Перелік посилань

1. Устаткування мембранної та холодильної техніки. Дослідження очищення води на установці зворотнього осмосу [Текст] : метод, вказівки до проведення науково-дослідної роботи для студ. спец. 8.090220 «Обладнання

хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» / Уклад. С.В.Сидоренко. - К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 13 с.

2. Vrouwenvelder H. Biofouling of spiral wound membrane systems. PhD thesis Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2009.

3. Запольський А.К. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод /А.К. Запольський, Н.А. Мішкова-Кліменко, І.М. Астрелін. – К.: Лібра, 2000. – 552 с.

4. Мулдер М. Введение в мембранную технологию: Пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 513 с. ил.

5. Soltanieh M., Gill W. Review of reverse osmosis membranes and transport models // Chemical Engineering Communications. – 1981. – Vol. 12. – pp. 279-363.

6. Baker R. W. Membrane technology and applications. – 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2004. – 2004.

7. Дытнерский Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчет. – М.: Химия, 1986.

8. Korniyenko Y., Guliienko S., Lialka M. Mathematical simulation of fouled modules regeneration // Ukrainian Food Journal. – 2015. – Volume 4 – P. 481–493.

9. Korniyenko Y. Mathematical model of dissolving inorganic fouling in spiral wound membrane module / Korniyenko Y. , Guliienko S. // The Advanced Science Journal. --- 2014. -- issue 4. – p. 47-50.

10. Корнієнко Я.М. Оцінка ефективності відновлення властивостей рулонованих мембранних модулів з використанням гідродинамічної кавітації / Корнієнко Я.М., Гулієнко С.В // Наукові парці ОНАХТ. – 2012. – Випуск 41. - Т.1 - с. 142-147

4.9 Контрольні запитання

1. Проаналізувати практичне значення мембранних процесів.

2. Пояснити конструкцію спірального мембранного модуля.
3. Проаналізувати фактори, що впливають на величину гідравлічного опору мембранного модуля.
4. Пояснити причини застосування теорії подібності.
5. Проаналізувати фізичний зміст критерію Ейлера
6. Проаналізувати фізичний зміст критерію Рейнольдса
7. Пояснити сутність еквівалентного діаметра.
8. Пояснити метод найменших квадратів.

5 ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСУ

5.1 Вступ

У всіх технологічних процесах для забезпечення протікання процесів необхідно забезпечувати певні витрати компонентів (газів, рідин, парів, тощо) [1]. Одним з пристроїв, що забезпечує переміщення середовищ є відцентровий насос.

Величина гідродинамічних опорів та втрат напору контактних пристроїв апаратів впливають на енергетичні витрати для проведення процесів.

Оскільки основні розміри апарата і оптимальний режим його експлуатації визначаються з гідравлічних залежностей, необхідно правильно підбирати насосні установки для забезпечення відповідних технологічних параметрів в апаратах.

МЕТА РОБОТИ: практичне ознайомлення з насосною установкою, визначення за експериментальними даними залежностей $V - H$, $V - N$, $V - \eta$, $V - H_c$, та параметрів робочої точки.

ЗАВДАННЯ:

1. Отримати експериментальні характеристики відцентрового насоса ($V - N$, $V - \eta$, $V - H$), проводячи першу серію дослідів при постійному числі обертів насоса n , але при різних витратах води;

2. Визначити характеристики мережі ($V - H_c$), проводячи другу серію дослідів при постійному відкритті засувки, але при різних числах обертів насоса;

3. Побудувати **дві** характеристики мережі ($V - H_c$) і графік роботи насоса $V - H$, $V - N$, $V - \eta$;

4. Визначити параметри робочих точок і параметри економічної роботи насосної установки.

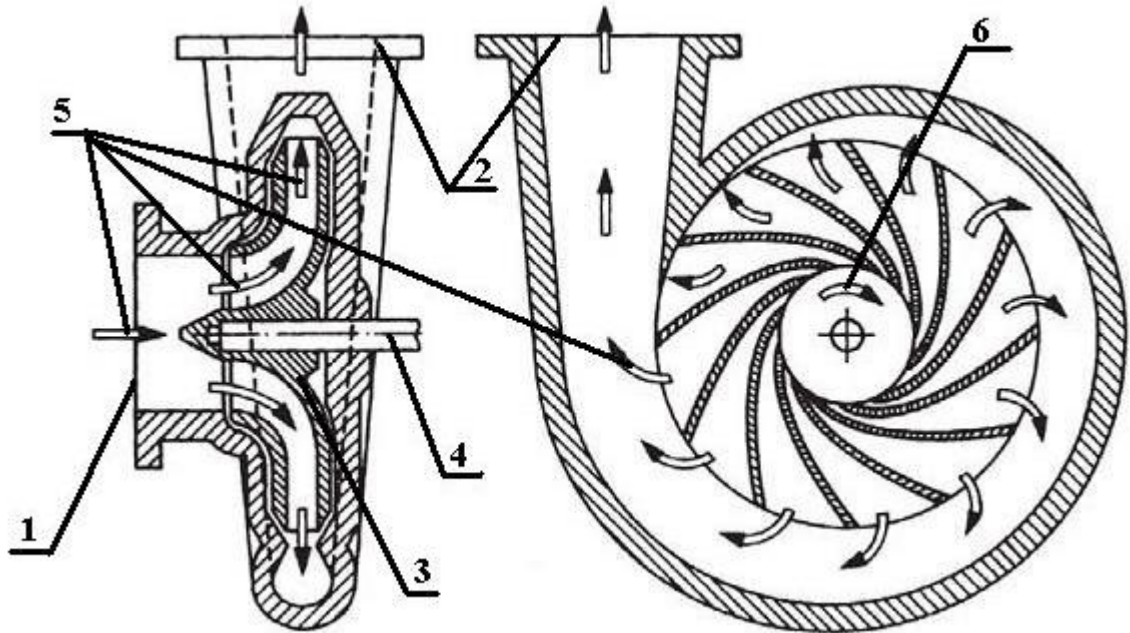
Лабораторна робота проводиться на стенді, розробленому авторами методичних вказівок [2].

5.2 Теоретична частина

Теоретичні відомості викладено за авторами [3...5]. У всіх галузях народного господарства, в тому числі хімічних, нафтохімічних і біотехнологічних виробництвах, для транспортування крапельних рідин трубопроводами використовують гідравлічні машини, які забезпечують потоку необхідну швидкість для подолання опорів на шляху її руху [1]. Такі гідравлічні машини отримали назву насосів. За принципом дії, незалежно від властивостей переміщуваної рідини насоси діляться на: лопатеві, об'ємні і струменеві. До групи лопатевих насосів належить і відцентровий насос. Одноступінчастий відцентровий насос має равликopodobний канал, всередині якого знаходиться робоче колесо 3, рисунок 5.1. Робоче колесо 3 відцентрового насоса встановлено на валу 4 та складається з одного чи двох дисків, з'єднаних вигнутими лопатками. Рідина подається по всмоктуючому патрубку 1 та відводиться по нагнітаючому патрубку 2. Рідина, що знаходиться між ними, приводиться в обертання разом з робочим колесом. При цьому кожна частинка рідини переміщується по складній траєкторії. По-перше, відцентрова сила, що відкидає рідину, змушуючи її рухатися радіально, уздовж лопаток від осі колеса до периферії. По-друге, рідина, що захоплюється лопатками колеса, яке обертається, окрім радіальної швидкості, набуває ще й колової швидкості, однакової зі швидкістю колеса. Враховуючи, що колова швидкість на периферії колеса більша, ніж біля входу в лопатки, то абсолютна (рівнодіюча) швидкість рідини на виході з колеса більша, ніж на вході. Таким чином, рідина, що проходить через робоче колесо відцентрового насоса, набуває додаткової кількості енергії.

Рідина, що викидається з периферії робочого колеса, надходить в равликopodobний направляючий канал, який кільцем охоплює робоче колесо. Поперечний переріз равликopodobного направляючого каналу збільшується в напрямку до вихідного патрубка апарату, що призводить до плавного зниження

швидкості рідини від максимальної, отриманої рідиною на виході з лопаток робочого колеса, до нормальної швидкості в трубопроводі. При цьому частина кінетичної енергії рідини перетворюється в потенційну енергію тиску, що супроводжується збільшенням напору (тиску) рідини.



1 – всмоктуючий патрубок; 2 – нагнітаючий патрубок; 3 – робоче колесо;
4 – вал; 5 – напрям руху робочої рідини в камері насоса; 6 – напрям руху валу

Рисунок 5.1 – Схема відцентрового насоса:

Для правильної експлуатації відцентрових насосів і їх підбору необхідно знати, як змінюються основні параметри насосів при різних умовах їх роботи. Величини, що характеризують роботу відцентрового насоса при даному числі обертів, зазвичай зображають у вигляді графічних залежностей напору H , потужності N і ККД η від продуктивності V . Приклад енергетичних характеристик відцентрового насоса зображено на рисунку 5.2.

Залежності $V-H$, $V-N$ та $V-\eta$ називаються енергетичними характеристиками насоса. Основою вважають характеристику $V-H$, тому, що витрати потужності N і ККД – η є наслідком роботи по створенню подачі V і напору H , які, відповідно, і є метою застосування насоса.

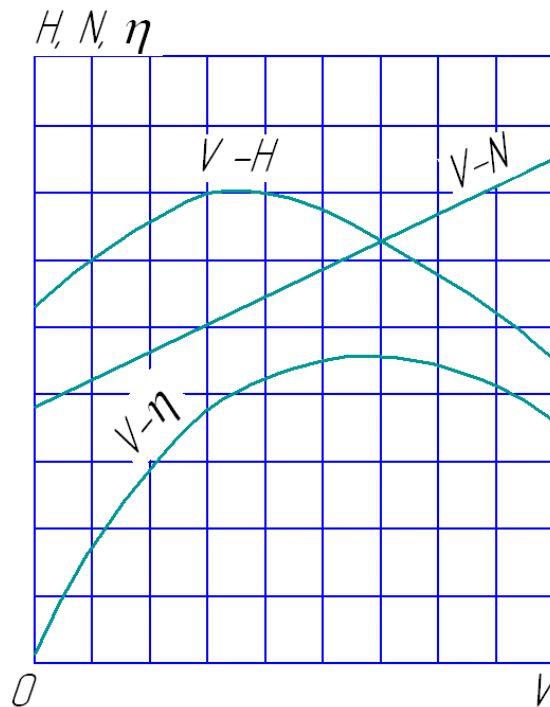


Рисунок 5.2 – Енергетичні характеристики відцентрового насоса

При зміні в невеликих межах числа обертів відцентрового насоса (приблизно в 1,5...2 рази) його подача V , напір H і потужність, що споживається N змінюються по залежностях, які називаються законами пропорційності:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{H_1}{H_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad)$$

Як випливає з рисунку 5.2, зі збільшенням подачі V потужність N , що споживається насосом, безперервно зростає. При закритому вентилі на нагнітальному трубопроводі ($V = 0$) насос споживає мінімальну кількість енергії, тобто має мінімальну потужність (лише на подолання тертя в підшипниках і сальникових ущільненнях, та на переміщення рідини робочим колесом в корпусі насоса). Тому, щоб не перевантажувати електродвигун, необхідно пускати відцентровий насос при закритій засувці. Вибір насоса та встановлення числа його обертів залежать від умов роботи насоса на мережу, що складається з трубопроводів та апаратів, що в ній встановлено. Ці умови визначаються так званою характеристикою мережі ($V - H_c$), тобто залежністю між витратами V і

напором мережі H_c , необхідним для подолання всіх опорів даного трубопроводу. У разі нестискуваної рідини:

$$H_c = \left(1 + \lambda \cdot \frac{l}{d} + \Sigma \zeta\right) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g} + H_{nid} + H_{ood}.$$

Підставляючи до цього виразу значення швидкості рідини з рівняння витрат:

$$w = \frac{V}{S},$$

Отримаємо:

$$H_c = \frac{\left(1 + \lambda \cdot \frac{l}{d} + \Sigma \zeta\right)}{2 \cdot g \cdot S^2} \cdot V^2 + H_{nid} + H_{ood} = k \cdot V^2 + b,$$

де $k = \frac{\left(1 + \lambda \cdot \frac{l}{d} + \Sigma \zeta\right)}{2 \cdot g \cdot S^2}$ – величина, що має наближене до постійного значення

для даного трубопроводу (мережі).

Отриманий вираз

$$H_c = k \cdot V^2 + b,$$

в координатах $(H_c - V)$ має форму параболи (рисунок 5.3), вершина якої розташована на осі ординат, на висоті $b = H_{nid} + H_{ood}$ від початку координат (H_{nid} – геометрична висота підйому рідини; H_{ood} – різниця напорів між просторами нагнітання і всмоктування).

Характеристика насоса і характеристики мережі наведено в одній системі координат, рисунок 5.4.

Перетин характеристик насоса $V - H$ і мережі $V - h_c$ визначає так звану «робочу точку». Ця точка показує умови спільної роботи системи «насос – трубопровід (мережа)», тобто $H = H_c$. У цій точці всі гідравлічні опори трубопроводу долаються напором, що створюється насосом. Вертикальна пряма, проведена через робочу точку, перетинає характеристики насоса $V - N$, $V - \eta$ і вісь абсцис в точках, що визначають показники роботи насоса за даних умов. Наприклад, для робочої точки А (рисунок 5.4) параметри роботи насоса

наступні: витрати V_A , напір H_A , потужність, що споживається N_A , ККД – η_A .
 Положення робочої точки дозволяє зробити висновок про ступінь використання можливостей насоса в даних умовах. Якщо, наприклад, взяти за робочу точку В, то, насос працюватиме на іншу мережу з іншими характеристиками.

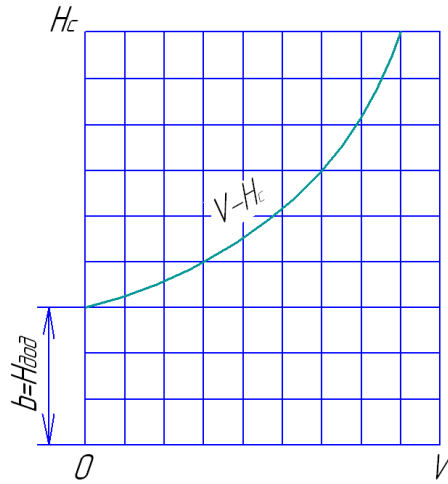


Рисунок 5.3 – Характеристика трубопроводу (мережі)

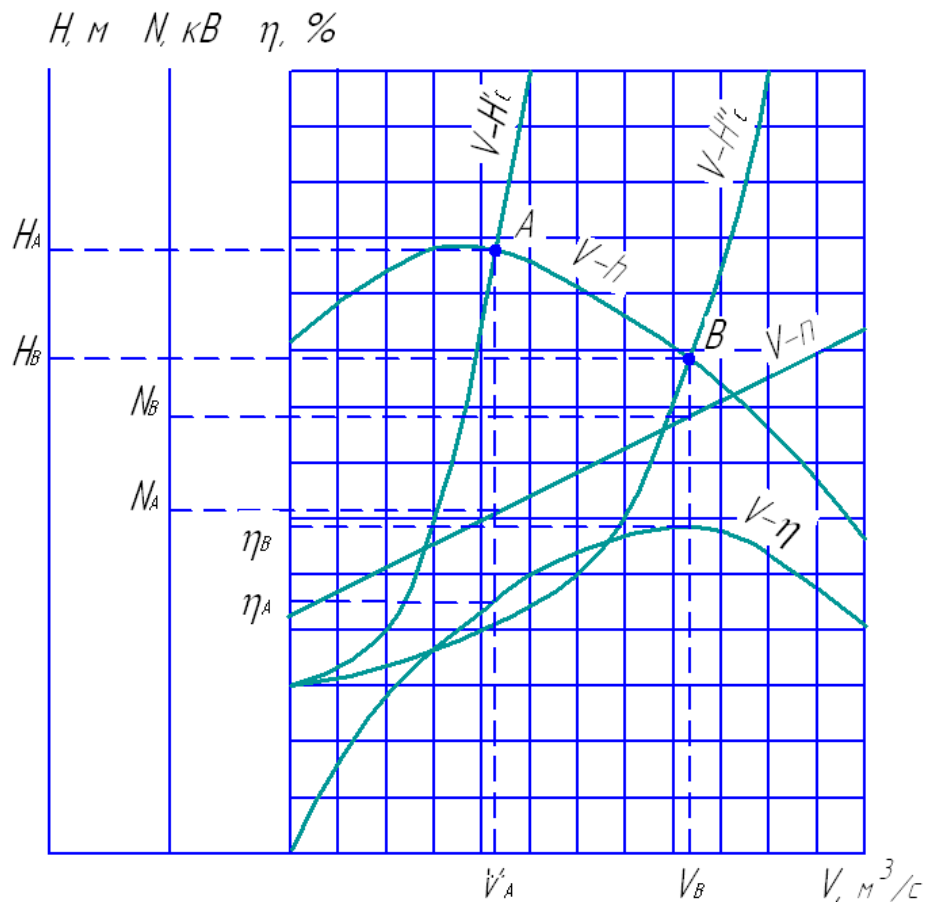
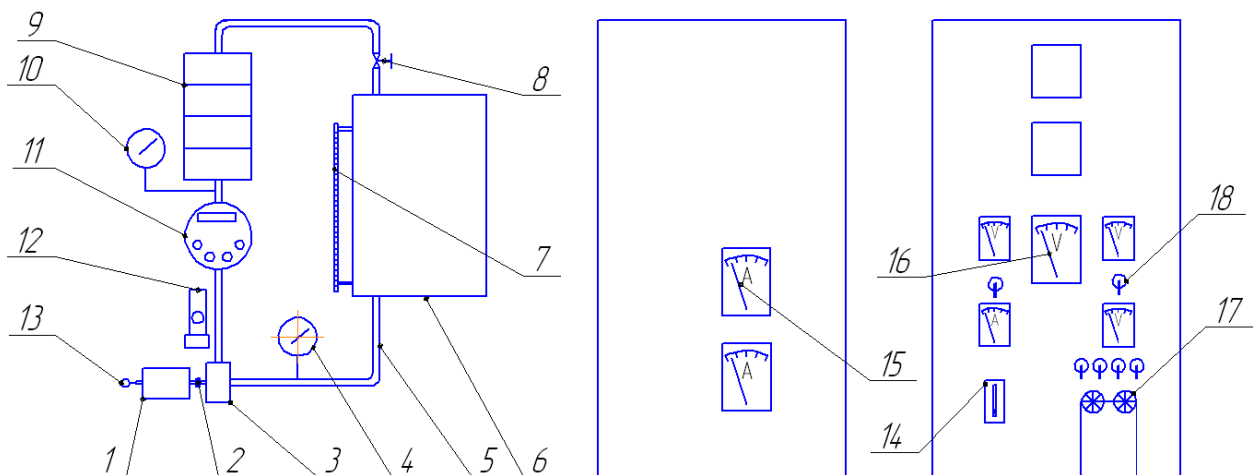


Рисунок 5.4 – Характеристики насоса і мережі,
 зображені в одній системі координат

5.3 Опис експериментальної установки

На рисунку 5.5 зображено схема експериментальної насосної установки. Відцентровий насос 3 через муфту 2 з'єднано з електродвигуном змінного струму 1. Число обертів вимірюється за допомогою строботахометра 12 або тахометра часового типу 13.



1 – електродвигун; 2 – муфта; 3 – відцентровий насос; 4 – вакуумметр;
5 – магістраль подачі води; 6 – видатковий бак; 7 – водомірна трубка;
8 – вентиль; 9 – теплообмінник (“гідравлічний опір”); 10 – манометр;
11 – лічильник витрат води; 12 – строботахометр; 13 – тахометр; 14 – тумблер пуску (зупинки) електродвигуна; 15 – амперметр; 16 – вольтметр; 17 – регулятор числа обертів двигуна; 18 – перемикач увімкнення вольтметра

Рисунок 5.5 – Схема насосної установки:

Вода засмоктується насосом 3 з витратного бака 6 через всмоктувальний трубопровід 5, на якому встановлено вакуумметр 4. Після відцентрового насосу 3 встановлено лічильник витрат води 11, манометр 10, теплообмінник (“гідравлічний опір”) 9 та вентиль 8 для регулювання витрати води. Вода з нагнітального трубопроводу повертається до видаткового баку, звідки знову засмоктується насосом. Рівень води в баку контролюється за допомогою водомірної трубки 7.

На панелі щита управління змонтовано тумблер пуску (зупинки) електродвигуна насоса 14, амперметр 15, а вольтметр 16 для вимірювання потужності електродвигуна та регулятор числа обертів двигуна 17, для вмикання вольтметра 16 встановлено перемикач 18.

5.4 Техніка безпеки

Перед вмиканням необхідно:

7. Провести огляд стенду з метою виявлення видимих пошкоджень обладнання.
8. Перевірити наявність заземлення.
9. Перевірити рівень води у видатковому баці, за необхідності долити воду з магістралі водного живлення установки.
10. Перевірити положення всіх вентилів та перемикачів і встановити їх у положення, що відповідає початку роботи на установці.
11. Роботу проводити тільки за інструкцією.
12. При виконанні роботи бути уважними: забороняється доторкатися до елементів конструкції, що обертаються та класти на них будь-які предмети.
13. В разі будь-яких неполадок в роботі, студентам забороняється намагатися усувати їх самостійно.

Після закінчення роботи:

1. Зупинити роботу двигуна регулятором обертів двигуна.
2. Вимкнути тумблер пуску (зупинки) електродвигуна насоса.
3. При необхідності закрити необхідні вентиля.

5.5 Методика проведення роботи

Випробування насосної установки проводять в два етапи. В першу чергу визначають величини, необхідні для побудови характеристик насоса:

$V - H$, $V - N$, $V - \eta$; в другу – величини, необхідні для побудови характеристики мережі $V - h_c$.

На першому етапі випробування проводять при постійному числі обертів насоса (число обертів задається викладачем), але при різних витратах води (подачах насоса). Зміна подачі виконується поступовим відкриттям вентиля 9 на нагнітальному трубопроводі. Перший замір проводять при повністю закритому вентилі, наступні – при його поступовому відкритті. Останній дослід на цьому етапі проводять при повністю відкритому вентилі. Число обертів насоса знімають з табло стробоскопічного тахометра 12 або тахометра 13 (залежно від комплектації установки) рисунок 5.5.

Зміни витрат у нагнітальному трубопроводі необхідно регулювати шляхом зміни положення вентиля 8 та контролювати за допомогою лічильника витрат води 11. Задані числа обертів двигуна контролюються строботахометром 12 або тахометром 2 при. При кожній зміні положення вентиля 8 в бік відкриття число обертів насоса буде зменшуватися, тому після повороту вентиля необхідно за допомогою регулятор числа обертів двигуна 17 відновити задане число оборотів двигуна насосу, а потім зробити наступні виміри: витрат води, що перекачує насос – лічильником витрат води 11, розрідження у всмоктувальній трубі вакуумметром 4, тиску в нагнітальній трубі манометром 10, сили струму амперметром 15 та напруги вольтметром 16. Результати необхідно занести до таблиці 1.

На другому етапі роботи заміри проводяться **дві** серії експериментів при постійних (заданих) витратах (відкритті вентиля), але при різних числах обертів насоса (не менше 5...6).

Для кожного числа обертів виконуються заміри подачі насоса, розрідження у всмоктувальній трубі і тиску в нагнітальній трубі. Потім змінюються положення вентиля (за завданням викладача) і проводиться друга серія замірів при тих же 5...6 числах обертів насоса, що і в першій серії.

Раніше відмічалось, що вершина параболи (характеристики $V-H$) розташовується по осі ординат на відстані b від початку координат:
 $b = H_{нид} + H_{дод}$.

Враховуючи, що як в даній установці додаткового напору $H_{дод}$ – немає, то
 $b = H_{нид}$.

За результатами, отриманими на другому етапі роботи, будуються дві характеристики $V-h_c$, та спільно з характеристиками насоса, що отримані на першому етапі ($V-H, V-N, V-\eta$) розміщуються в одній системі координат, за прикладом, наведеним на рисунку 5.4. На перетині кривих $V-h_c$ і $V-H$ отримаємо робочі точки А і В, за якими визначаються параметри роботи насосної установки. Повний напір насоса H , який виражається в метрах стовпа рідини, що подається, визначається наступним чином:

$$H = P_M + P_B + h + \frac{w_{наг}^2 - w_{вс}^2}{2},$$

де P_M і P_B – результати заміру показників манометра і вакуумметра, м вод. ст; h – відстань між місцями приєднання манометра і вакуумметра, м; $w_{наг}$ і $w_{вс}$ – швидкість в нагнітальному та у всмоктуючому трубопроводах відповідно, м / с.

Виходячи з того, що в установці всмоктуючий і нагнітальний трубопроводи мають однаковий діаметр, то $w_{наг} = w_{вс}$.

Таким чином:

$$H = P_M + P_B + h.$$

5.6 Обробка результатів експериментів

Потужність, що споживається двигуном, Вт, визначається виразом:

$$N_d = U \cdot I$$

де U – напруга, В; I – сила струму, А.

Корисна потужність, що передає насос рідині, кВт:

$$N_{кор} = 0,01 \cdot V \cdot \rho \cdot g \cdot H$$

де V – продуктивність (подача) насоса, м³/с; ρ – густина рідини, що перекачується, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; H – повний напір, що створюється насосом, м вод. ст.

Коефіцієнт корисної дії насосної установки η визначається за виразом:

$$\eta = \frac{N_{кор}}{N_{\delta}}$$

Всі величини, виміряні в процесі експериментів і отримані після розрахунків записуються до таблиць 5.1 та 5.2. Після чого будується графік, за зразком графіка, наведеного на рисунку 5.4, і визначаються параметри робочих точок А і В.

Проводиться аналіз отриманих результатів та записуються висновки за результатами досліджень.

5.7 Контрольні запитання

1. Проаналізуйте класифікацію насосів.
2. Опишіть конструкцію відцентрового насосу.
3. Опишіть принцип дії відцентрового насосу.
4. Яке призначення має спіральний равликоподібний канал?
5. Які залежності називаються енергетичними характеристиками насоса?
6. Що таке характеристика трубопроводу (мережі)?
4. Що таке закони пропорційності?
5. З яких складових складається напір H_c , що втрачається в мережі?
7. З яких складових складається повний напір насоса?
8. Що таке корисна потужність, що передає насос рідині?
9. Що таке коефіцієнт корисної дії насосної установки?
6. Який фізичний зміст має робоча точка?
7. Який фізичний зміст має характеристика мережі?

Таблиця 5.1 – Характеристика насоса при постійному числі обертів

№ з/п	Число обертів n , об/сек	Продуктивність V , м ³ /с	Відстань між місцями приєднання манометра і вакуумметра, h , м	Тиск		Розрідження		Повний напір, H , м вод. ст.	Сила струму I , А	Напруга U , В	Потужність N , Вт	ККД, η_A , %
				P_M , ат	P_M , м вод. ст.	P_B , ат	P_B , м вод. ст.					
І етап (при постійному числі обертів) $n = \text{об} / \text{хв}$												
1												
2												
2												
3												
4												
5												
6												

7												
8												
9												
10												

Таблиця 5.2 – Характеристики мережі при постійних витратах

№ серії з/п	№ з/п дослідю	Число обертів n , об/сек	Продуктивність насоса V , м ³ /с	Відстань між місцями приєднання манометра і вакуумметра, h , м	Тиск		Розрідження		Повний напір, H , м. вод. ст.
					P_M , ат	P_M , м вод. ст.	P_B , ат	P_B , м вод. ст.	
II етап (при постійному відкритті засувки і різних числах обертів)									
1	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								

2	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ:

– густина, кг/м³: $\rho_g = 1000 - 0,062 \cdot t - 0,00355 \cdot t^2$;

– теплопровідність, Вт/(м·К): $\lambda_g = 0,5544 + 0,0246 \cdot t - 0,00001184 \cdot t^2$

– коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с: $\mu_g = 0,59849(43,252 + t)^{-1,5423}$

5.8 Перелік посилань

1. Сидоренко С.В., Казачинська Н.В. Дослідження графітового теплообмінника. Методичні вказівки / Уклад. Сидоренко С.В., Казачинська Н.В.. – К.: НТУУ «КПІ», 1978.–26с.

2. Процеси первинної газо- нафтопереробки. Процеси первинної газо-нафтопереробки [Електронний ресурс] : навчальний посібник / НТУУ «КПІ» ; уклад. А. Р. Степанюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 291 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 126 с. – Назва з екрана. – Доступ: <http://ci.kpi.ua/metodopen> 126 с.

3. Касаткина А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1973.-752с.

4. Гидравлика и теплотехника [Электронный ресурс]: сборник описаний лабораторных работ для студентов специальности 280201 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», направлений бакалавриата 280200 «Защита окружающей среды» и 280700 «Техносферная безопасность» (профиль: Инженерная защита окружающей среды) всех форм обучения : самост. учеб. электрон. изд. / Сыкт. лесн. ин-т ; сост. Е. Г. Казакова, Т. Л. Леканова. – Изд. 2-е, перераб. – Электрон. дан. – Сыктывкар : СЛИ, 2012. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>. – Загл. с экрана.

5. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Башта Т.М. и др. – М.: Машиновстроение, 1982. – 423 с.