

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**



## ***ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ГІДРАВЛІКА***

***МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
щодо виконання лабораторних робіт***

**СУМИ 2023**



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**  
**Кафедра „Енергетика та електротехнічні системи”**

***ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ГІДРАВЛІКА***

***МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ***  
***щодо виконання лабораторних робіт***

*для здобувачів вищої освіти спеціальності*  
**141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**  
*для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, ступеня вищої освіти*  
**«Бакалавр» для студентів денної та заочної форм навчання**

**СУМИ 2023**

**Укладачі:** **Сіренко В.Ф.**, к.т.н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем;  
**Сіренко Ю.В.**, PhD, доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем;  
**Вольвач Т.С.**, асистент кафедри енергетики та електротехнічних систем.

**Автори:** **Сіренко В.Ф., Сіренко Ю.В., Вольвач Т.С.**  
**M54** **Науково-методичне забезпечення навчального процесу: Теплотехніка та гідравліка.** Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт для здобувачів вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, ступеня вищої освіти «Бакалавр» для студентів денної та заочної форм навчання - Суми, 2023. - 88 с.

Методичні вказівки складаються 19 тем, починаючи з вступної «Вступ до курсу, робоче тіло і параметри його стану» до заключної «Теплопередача». В цьому діапазоні розглянуті такі характерні питання, які торкаються основних законів термодинаміки, основних термодинамічних процесів, вологе повітря, теоретичних циклів ДВЗ, ГТУ, ПСУ, ХУ, теплопередача, теплопровідність, конвективний, променевий теплообмін та основні джерела та споживачі теплоти та 5 лабораторних робіт: перевірка пружинних манометрів, вимірювання гідростатичного тиску, вивчення стану відносного спокою рідини, дослідження режимів течії рідини, визначення втрат напору по довжині трубопроводу.

**Рецензенти:**

**Чепіжний А.В.** – к.т.н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ;  
**Соларьов О.О.** – к.т.н., доцент кафедри транспортних технологій СНАУ.

**Відповідальний за випуск:**

**Сіренко Ю.В.**, PhD, доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ.

Рекомендовано до видання навчально-методичною радою інженерно-технологічного факультету СНАУ. Протокол № 6 від „22” травня 2023 року.

## Тема 1. Робоче тіло і параметри його стану.

1. Поняття про теплотехніку і її роль в розвитку суспільства.
2. Поняття про технічну термодинаміку, термодинамічну систему.
3. Робоче тіло і параметри його стану.
4. Рівняння стану ідеального і реального газів.
5. Основні газові закони.

**Теплотехніка** – наука, що вивчає методи отримання, перетворення, передачі і використання теплоти, а також принципи дії і конструктивні особливості машин і апаратів, призначених для цих цілей.

Значення теплотехніки в розвитку будь-якого суспільства величезне. Щоб виплавити чавун, сталь, необхідно забезпечити отримання температури близько 1550 °С. Щоб отримати цемент, необхідна температура приблизно 1400 °С. Щоб отримати бензин, дизпаливо, мазут, необхідні температури до 570 °С. Неможливо уявити сучасне життя без обігріву, освітлення житлових приміщень, електричних пристроїв, комунально-побутових послуг, на які також витрачається теплова енергія. Так що можна сказати, що сучасну цивілізацію зробила теплота і теплотехніка.

Складовою частиною (теоретичною основою) теплотехніки є технічна термодинаміка. **Технічна термодинаміка** – наука, що вивчає закономірності взаємного перетворення теплоти і роботи, а також властивості тіл за допомогою яких ці перетворення відбуваються. Такі тіла (як правило, газоподібні) називаються робочими тілами (р. т.).

**Робоче тіло** – це газо- або пароподібні тіла (речовини), за допомогою яких в теплотехнічних установках теплоту можна перетворити в роботу і навпаки – роботу в теплоту.

Всяке робоче тіло завжди знаходиться в чітко визначеному стані, який може бути охарактеризований деякими незалежними фізичними параметрами. В якості таких визначають (виступають):

1. абсолютний тиск робочого тіла –  $p$ , Па;
2. абсолютна температура р. т. –  $T$ , К;

3. питомий об'єм р. т. –  $v = \frac{V}{m}$ ,  $\frac{м^3}{кг}$ ,

де  $V$  – повний об'єм, який займає р. т.  $м^3$ ;

$m$  – маса робочого тіла, кг.

Між цими параметрами має місце певний зв'язок, встановлений в 1834 р. професором Петербурзької академії наук – Клапейроном: для 1-кг р. т.

(ідеального газу):  $\frac{pv}{T} = const = R$  - характеристична газова стала,  $\frac{Дж}{кг \cdot К}$  або

$$pv = RT. \text{ Для "m" кг р. т. рівняння стану записується як } pV = mRT.$$

Щоб правильно користуватись цим рівнянням, потрібно підставляти в

нього:  $p$  – в Па;  $V$  – в  $м^3$ ;  $T$  – в К;  $m$  – в кг,  $R$  – в  $\frac{Дж}{кг \cdot К}$ . ( $R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{\mu}$ ,  $\frac{Дж}{кг \cdot К}$ , де

$\mu$  – молекулярна маса р. т. Тут  $R_{\mu} = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$  – універсальна газова стала).

Для реального газу рівняння стану записується в вигляді рівняння Ван-дер-Ваальса (1870 р.) для 1 кг р. т.  $\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$ ,

де  $a$  і  $b$  – сталі, які знаходяться експериментальним шляхом.

Вони залежать від природи газу і характеризують:

„ $a$ ” – сили взаємодії між молекулами реального газу;

„ $b$ ” – власний об'єм молекул.

Нормальні фізичні умови (н.ф.у.)  $p = 760$  мм. рт. ст. та  $t = 0^\circ\text{C}$ .

Нижче наведено декілька задач, рішення яких можна використати рівняння Клапейрона. Воно гарантує достатню точність розрахунків, особливо при невеликих тисках і високих температурах.

**Задача №1.** Яку кількість вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) було витрачено з балону ємністю 40 л, якщо манометричний тиск в балоні зменшився з 15 МПа до 3 МПа, а температура і тиск навколишнього середовища залишатись при цьому незмінними і рівними відповідно  $20^\circ\text{C}$  і 750 мм. рт. ст.

**Рішення:**

1. Кількість вуглекислого газу в балоні до початку витрат:

$$m_1 = \frac{p_1 V}{R_{\text{CO}_2} T} = \frac{15,1 \cdot 10^6 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{189 \cdot 293} = 10,9 \text{ кг.}$$

2. Кількість вуглекислого газу в балоні після закінчення витрат:

$$m_2 = \frac{p_2 V}{R_{\text{CO}_2} T} = \frac{3,1 \cdot 10^6 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{189 \cdot 293} = 2,25 \text{ кг.}$$

3. Кількість витраченого з балону газу:  $\Delta m = m_1 - m_2 = 10,9 - 2,25 = 8,65 \text{ кг.}$

Тут:  $p_1 = p_{\text{ман}_1} + p_{\text{бар}} = 15 \cdot 10^6 + 750 \cdot 133,3 = 15,1 \text{ МПа. (1 мм рт. ст. = 133,3 Па)}$

$$p_2 = p_{\text{ман}_2} + p_{\text{бар}} = 3 \cdot 10^6 + 750 \cdot 133,3 = 3,1 \text{ МПа.}$$

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{\text{CO}_2}} = \frac{8314}{44} = 189 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$R_{\mu} = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \text{ – універсальна газова стала.}$$

$$T_1 = T_2 = 273 + t = 273 + 20 = 293 \text{ К.}$$

**Задача №2.** В балоні знаходиться азот ( $\text{N}_2$ ) масою 13,5 кг при манометричному тиску 12 МПа і температурі  $27^\circ\text{C}$ . Визначити ємність балону, а також манометричний тиск в ньому (в ат.) після витрати з нього 10 кг газу. Температура залишеного в балоні газу стала рівною  $17^\circ\text{C}$ . Барометричний тиск при всьому цьому був рівним 750 мм. рт. ст.

**Рішення:**

$$1. \text{ Ємність балону: } V = \frac{m_1 R_{N_2} T_1}{p_1} = \frac{13,5 \cdot 297 \cdot 300}{12,1 \cdot 10^6} = 0,1 \text{ м}^3 = 100 \text{ л},$$

$$\text{Де: } R_{N_2} = \frac{R\mu}{\mu_{N_2}} = \frac{8314}{28} = 297 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

2. Тиск газу, що залишився в балоні:

$$p_2 = \frac{m_2 R_{N_2} T_2}{V} = \frac{3,5 \cdot 297 \cdot 290}{0,1} = 3 \text{ МПа}$$

3. Манометричний тиск газу в балоні:

$$p_{\text{ман}} = p_2 - p_{\text{бар}} = 3,0 - 0,1 = 2,9 \text{ МПа} = 29 \text{ ат.}$$

### Задачі для самостійного рішення.

**Задача №1.** Яку кількість балонів ємністю 40 л необхідно для перевезення 200 кг вуглекислого газу, якщо при температурі +27 °С і барометричному тиску 750 мм. рт. ст. манометричний тиск в балоні не повинен перевищувати 17 МПа.

**Відповідь:** 17 балонів.

**Задача №2.** Визначити кількість і масову густину метану ( $CH_4$ ) у резервуарі об'ємом 50 м<sup>3</sup>, якщо його температура дорівнює +17 °С, манометричний тиск в резервуарі 5,9 МПа, а барометричний тиск складає 750 мм. рт. ст.

**Відповідь:** 2000 кг, 40 кг/м<sup>3</sup>.

**Задача №3.** У резервуарі ємністю 10 м<sup>3</sup> знаходиться повітря ( $\mu=29$ ) під манометричним тиском 0,05 МПа і температурі +17 °С. Після «підкачування» повітря компресором манометричний тиск повітря підвищився в резервуарі до 0,525 МПа, а температура – до +47 °С. Визначити, скільки кг повітря було «підкачано» в резервуар, якщо барометричний тиск складав 750 мм. рт. ст.

**Відповідь:** 50 кг.

### Контрольні питання.

1. Що називається робочим тілом?
2. Якими основними параметрами характеризується стан робочого тіла?
3. Що розуміють під ідеальним газом? Чим він відрізняється від реального?
4. Який має вигляд рівняння стану ідеального газу (для « $m$ » кг газу)? Розмірності вхідних величин рівняння?
5. Фізичний зміст характеристичної та універсальної газових сталих? Зв'язок між ними?

### Лабораторна робота № 1. Перевірка пружинних манометрів.

**Мета роботи:** закріплення знань за розділом "Гідростатика" та «Прилади для вимірювання тиску». Оволодіти методикою експериментальних вимірювань гідростатичного тиску пружинними манометрами і перевірки робочих манометрів.

### Завдання:

1. Визначити зміну показань перевіряемого манометра при збільшенні і зменшенні тиску по всій шкалі приладу.
2. Визначити зміну показань зразкового манометра при збільшенні і зменшенні тиску по всій шкалі приладу.
3. Визначити величину похибок в контрольних точках і порівняти отримані результати з максимально допустимими значеннями.
4. Зробити висновок щодо відповідності приладу своєму класу точності.

### **План.**

1. Вивчення будови пружинних манометрів і типів похибок при вимірюванні.
2. Ознайомлення з правилами експлуатації пружинних манометрів.
3. Вивчити будову стенду МП-600 для перевірки манометрів.
4. Аналіз порядку перевірки пружинного манометра.
5. Перевірка технічного манометра і запис показань приладів, обробка результатів вимірювань.

### **1. Вивчення будови пружинних манометрів і типів похибок при вимірюванні.**

У техніці для вимірювання великого діапазону тиску 0,5-1000 ат і вакууму широко використовуються манометри з одновитковою трубчастою пружиною. Будова приладу показана на стенді.

Основною деталлю є зігнута по дузі кола порожниста трубка 1, запаяна з одного кінця, а іншим вона приєднана до штуцера 7. Поперечний перетин трубки 1 має овальну форму. Велика вісь паралельна осі одновиткової трубчастої пружини. Під дією перепаду тиску відбувається деформація перетину трубки: велика вісь овалу меншає, а менша збільшується.

Внаслідок цього трубка під дією надмірного тиску розгинається, а при тискові менше за атмосферний (тобто під дією вакууму) зменшити радіус кривизни. Переміщення запаяного кінця трубки за допомогою передаточного механізму, що складається з поводка 5, зубчатого сектора 2, перетворюється в переміщення стрілки 8. На осі стрілки насаджена трибка (шестерня з малим числом зубів), яка знаходиться в зачепленні із зубчатим сектором. Для підвищення точності показань приладу люфт між зубцями усувається спіральною пружиною 11. Весь механізм закривається корпусом 3, на передній панелі знаходиться циферблатна шкала 9.

Технічні манометри мають клас точності від 0,5 до 6, зразкові - 0,2, 0,4.

Клас точності приладу - величина максимально допустимої абсолютної похибки, виражена у відсотках від найбільшого значення на шкалі приладу.

### **2. Ознайомлення з правилами експлуатації пружинних манометрів.**

1. У місці установки приладу повинні бути відсутні вібрації і струси.
2. Робоче положення манометра - вертикальне і в основному штуцером вниз.
3. Прилади включаються і вимикаються повільним поворотом рукоятки вентиля.

4. Перед початком і в кінці вимірювань перевіряється установка стрілки на нуль.

### 3. Вивчення будови стенду МП-600 для перевірки манометрів.

Технічні манометри перевіряють на відповідність приладу до його класу точності. Для лабораторних приладів метою перевірки є побудова тарировочної залежності  $\Delta p = f(p)$ , необхідної для компенсації систематичної погрішності. Як зразковий прилад застосовують манометри з максимальною абсолютною похибкою в чотири рази меншої і з більшим діапазоном вимірювань, щоб шкала зразкового манометра перекривала шкалу що, перевіряється.

На рис. 1. зображена схема установки для перевірки пружинних манометрів. Конструкція установки забезпечує проведення перевірки по показанням зразкових манометрів двох типів: 1) вантажопоршневого; 2) пружинного.

В установці всі складові вузли приєднуються за допомогою вентильних кранів 10, 14 до трубки 1, яка заповнюється маслом з ємності 5.

Спочатку тиск в гідросистемі створюється плунжерним насосом 2. Точна установка необхідного тиску проводиться пресовим пристроєм, що складається з плунжера 3 і гвинтового механізму з штурвалом 4. Тиск, що створюється в рідині, одночасно вимірюється випробуваним манометром 9, зразковим випробуваним пружинним 8, або зразковим вантажним манометром 7, в якому тиск рідини встановлюється кількістю змінних вантажів. Всі вузли розміщені на плиті, горизонтальне положення якої виставляється мікрометричними гвинтами.

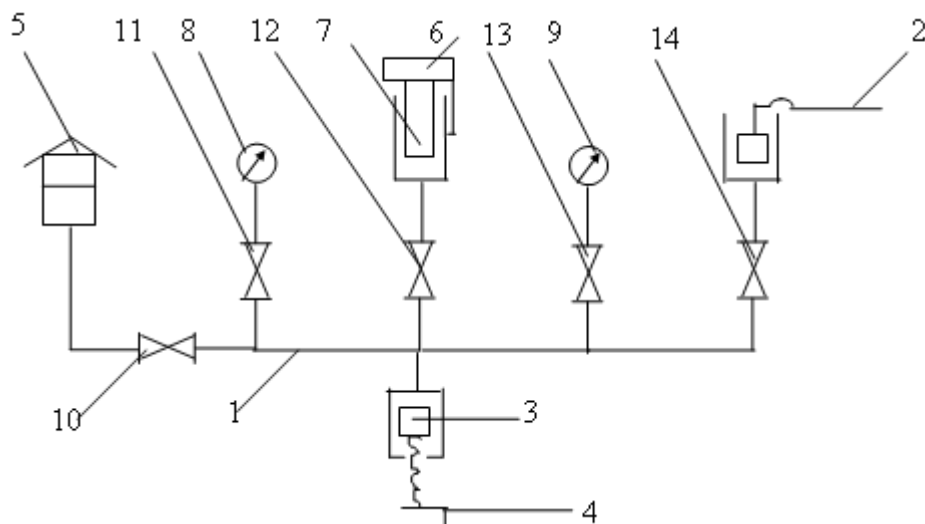


Рис. 1. Установка для проверки пружинных манометров.

### 4. Аналіз порядку перевірки пружинного манометра.

1. Манометр 9 приєднують до установки.
2. Закривши вентилі 11, 12, і 13 від'єднують манометри від системи.

3. Циліндр пресового пристрою і трубопровід заповнюють плунжерним насосом 2 при відкритому вентилі 14 і максимально виведеному поршні 3. Після заповнення установки маслом кран 14 закривають.

4. Корпус приладу встановлюють в горизонтальному положенні за допомогою мікрометричних гвинтів, і перевіряють по рівню.

5. Рівномірно розподіляють по шкалі манометра контрольні точки. Для класів 4-6 намічають три точки, для класів 1-2,5 в п'ять точок.

6. У більш точних приладах призначають десять точок.

7. У протоколі відмічають початкове положення стрілки.

8. Вантаж, відповідний заданому тиску в першій точці, встановлюється на тарілку 6, відкривають ventиль 12 і приводять у рух плунжер 7 спільно з вантажем. Обертаючи штурвал 4 за годинниковою стрілкою підвищуємо тиск масла доти, поки плунжер спливе до рівня покажчика на тарілці.

9. Відкривають ventиль 13, тим самим включають випробуваний манометр 9. Повертаючи штурвал 4 підтримують заданий тиск на вантажному поршневому манометрі 7. Записують в протокол показання випробуваного манометра (після легкого постукування по корпусу манометра).

10. Операції викладені в пп. 7 і 8, послідовно виконують для всіх намічених точок. Потім витримують систему при найбільшому тиску протягом 5 хвилин.

11. Проводять повторні вимірювання з самого початку, тим самим для кожної точки отримують 4 значення тиску, що цілком досить для виключення випадкових похибок при обчисленні середнього арифметичного тиску.

$$P_{\text{ср}i} = \frac{(P_i \uparrow + P_i \downarrow)_1 + (P_i \uparrow + P_i \downarrow)_2}{4},$$

де  $P_{\text{ср}i}$  - середнє арифметичне значення показань випробуваного манометра, Па;

$P_i \uparrow$  - показання манометра при збільшенні тиску, Па;

$P_i \downarrow$  - показання манометра при зменшенні тиску, Па.

У кожній наміченій точці обчислюємо абсолютну систематичну похибку:

$$P_i = P_{\text{ср}i} - P_{\text{зразк.}},$$

де  $\Delta P_i$  - абсолютна похибка, Па;

$\Delta P_{\text{ср}i}$  - середнє арифметичне значення тиску, Па;

$P_{\text{зразк.}}$  - показання зразкового манометра, Па.

Максимальне розходження показань приладів при прямому і зворотному ході:

$$\eta = | P_i \uparrow - P_i \downarrow |.$$

При використанні як еталонних приладів зразкових манометрів перевірка пружинних манометрів проводиться в тому ж порядку, за винятком пунктів 7 і 8, які формулюються таким чином.

7. За допомогою плунжерного насоса 2 створюємо тиск в мережі не набагато менше необхідного. Закриваємо ventиль 14.

8. Відкриваємо ventилі 11 і 13, тим самим приєднуємо зразковий і випробуваний манометри. Повільно повертаючи за годинниковою стрілкою

штурвал 4 поршнем 3 поступово доводимо тиск до необхідного. Величину тиску в системі встановлюємо по показанням зразкового манометра.

#### 5. Перевірка технічного манометра і запис показань приладів, обробка результатів вимірювань.

Запис показань приладів і обробка результатів виконується в протоколі.

| Рзр<br>азк<br>. | Р <sub>ср</sub> | Pi↑ | Pi↓ | $\Delta\uparrow = P_{i\uparrow} - P_{ср}$ | $\Delta\downarrow = P_{i\downarrow} - P_{ср}$ | Результати перевірки                                                                                                         |
|-----------------|-----------------|-----|-----|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                 |                 |     |     |                                           |                                               | 1. Положення стрілки при нульовому тиску.<br>2. Найбільша абсолютна систематична похибка.<br>3. Найбільша варіація показань. |

Р<sub>ср</sub>. вираховується. За формулою (1)

Прилад вважаємо, таким що задовольняє класу точності, якщо дані із останньої колонки протоколу знаходяться в межах найбільшої похибки приладу, яка співпадає з половиною ціни поділки шкали манометра.

Якщо прилад використовується як лабораторний, то обчислюємо поправки до показань випробуваного приладу

$$\Delta P = P_{\text{зразк.}} - P_{\text{ср}},$$

і будуємо графік залежності  $\Delta P = f(P_{\text{ср}})$ .

Зміст звіту. Мета роботи. Схема установки і розрахункові формули. Протокол випробувань. Поправочний графік.

#### Контрольні питання.

1. Будова пружинних манометрів.
2. Призначення тарування пружинних манометрів.
3. Клас точності приладів.
4. Типи похибок показань приладів.

#### Лабораторна робота № 2. Вимірювання гідростатичного тиску.

**Мета роботи:** Закріплення знань за розділом "Гідростатика", набуття навичок вимірювання гідростатичного тиску рідинними приладами.

#### Завдання:

1. Визначити абсолютний тиск над рідиною в резервуарі при надлишковому тиску, а потім при розрідженні.
2. Визначити абсолютний тиск на дні резервуара з допомогою пьезометра і за показаннями U-образного мановакуумметра.

### 3. Порівняти отримані результати.

#### План

1. Засвоєння основних вимог техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт.
2. Ознайомлення з будовою лабораторної установки ГД-1.
3. Вимірювання надмірного тиску.
4. Вимірювання вакууму.
5. Заповнити протокол вимірювань і зробити висновки.

#### **1. Засвоєння основних вимог техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт.**

Основні вимоги техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт.

- а) Включати установки слід тільки з дозволу викладача;
- б) Не торкатися струмопровідних частин і частин, що обертаються;
- в) При виявленні несправності установки, наявності води і масла на підлозі негайно інформувати викладача;
- г) Студенти не знайомі з конструкцією установки, до виконання лабораторної роботи не допускаються.

#### **2. Ознайомлення з будовою лабораторної установки ГД-1.**

Лабораторна робота виконується на установці ГД-1, схема якої представлена на рис. 2. У процесі досліджень вимірюється тиск і вакуум над поверхнею води в основному резервуарі. А, розташованому в центрі установки. Під ним розміщений резервуар В (основна частина вакуумметра). Основні органи керування винесені на панель в нижній частині установки.

До складу установки входять такі прилади для вимірювання тиску: диференціальні манометри 2 і 1, заповнені водою і спиртом і що постійно з'єднуються з ємністю А, п'єзометр 3 через кран 5 (5') приєднаний до резервуара А; вакуумметр 4 спільно з ємністю Б.

Надмірний тиск над поверхнею рідини в резервуарі А створюється ручним насосом 6; до вимірювальної мережі він підключається за допомогою крана 7 (7'). У тому ж повітряному просторі вакуум створюється водоструминним насосом 8. Величина вакууму регулюється подачею води - вентиль 9 (9'). Підключається вакуум - насос до мережі вентилем 8, розташованим на верхній панелі приладу. Для приведення мережі, що досліджується в початковий стан повітряна камера А з'єднується із атмосферою краном 11 (11'). Вентиль 9(9') і двохпозиційні крани 11(11'), 5(5') і 7 (7') розташовані на нижній панелі установки. Положення крана відкрито «1», закрито «0».

Для заповнення і зливу води з ємностей встановлені два вентиля (на схемі не показані).

#### **Вимірювання надмірного тиску.**

Відкрити крани 5(5'), 7(7'), закрити крани 10, 11 (11'). За допомогою ручного насоса 6 створити надмірний тиск над поверхнею рідини в резервуарі А (до 400 мм вод. ст.), закрити кран 7(7'). Після встановлення рівнів рідини в

трубках необхідно виміряти різниці рівнів в дифманометрах 1 і 2 і порівняти їх показання з величиною підйому води в п'єзометрі 3. Потім змінити тиск повітря над поверхнею рідини. Досліди повторити три рази.

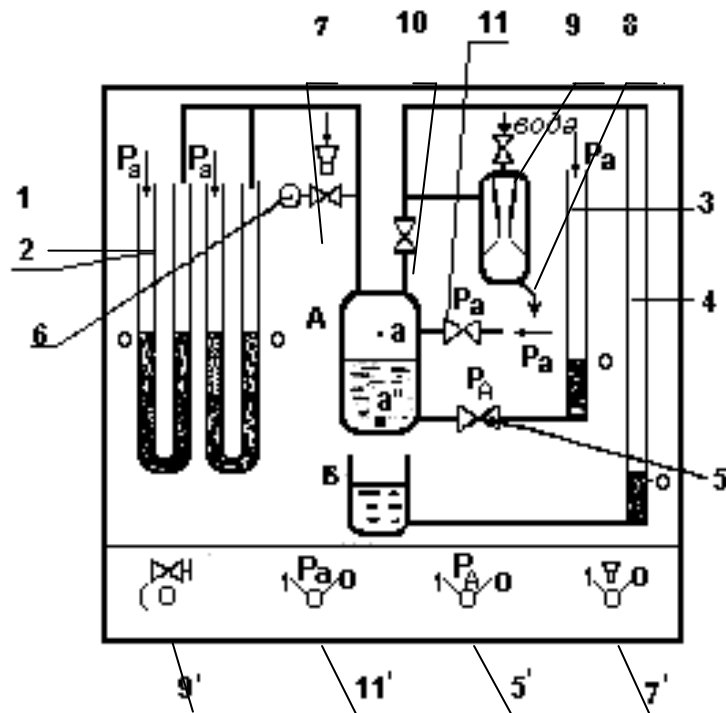


Рис. 2. Схема лабораторної установки.

### Вимірювання вакууму.

Відкривши кран 11(11') привести установку до початкового стану. Закрити крани 11(11'), 5 (5'), 7(7'). Відкрити кран 10. Поступово, відкриваючи вентиль 9(9'), запустити водоструминний насос 8. Після встановлення вакууму в ємності А закрити кран 10, вимкнути насос 8 і заміряти різниці рівнів рідини в диференціальних манометрах 1 і 2. По величині підйому води в трубці вакуумметра 4 виміряти величину вакууму і порівняти із показниками приладів 1 і 2. Дослід повторити три рази. В кінці роботи відкрити кран 11(11').

### 5. Заповнити протокол вимірювань і зробити висновки.

При виконанні лабораторної роботи на рідину, що знаходиться в стані спокою, діє тільки одна масова сила - сила ваги. Відповідно до основного закону гідростатики абсолютний тиск в точці рідини а дорівнює :

$$P_a = P_0 + \gamma h,$$

де  $P_a$  - абсолютний тиск, Па;

$P_0$  - тиск над вільною поверхнею рідини Па;

$\gamma$  - питома вага рідини,  $\frac{H}{м^3}$  ;

$h$  - відстань від вибраної точки до вільної поверхні рідини, м.

Величина абсолютного гідростатичного тиску вимірюється тільки барометром-анероїдом, де величина тиску повітря порівнюється з тиском всередині вакуумованої ємності. У всіх інших відомих приладах: рідинних

(п'єзометр, вакуумметр, диференціальний манометр, мікроманометр і інш.), механічних манометрах (мембранних, пружинних, сильфонних) тиск, що вимірюється, порівнюється з атмосферним.

Якщо абсолютний тиск в точці А (мал. 2) більший за атмосферний, тоді величина його перевищення над атмосферним називається надмірним тиском.

$$P_{\text{надм}} = P_a - P_{\text{ат}},$$

де  $P_{\text{надм}}$  - надмірний тиск, Па;

$P_a$  - абсолютний тиск, Па;

$P_{\text{ат}} = 98100$  Па- атмосферний тиск.

А якщо абсолютний тиск в точці А менший від атмосферного, тоді величина тиску, що не вистачає до атмосферного, називається розрідженням або вакуумом:

$$P_{\text{вак}} = P_{\text{ат}} - P_{a'},$$

де  $P_{\text{вак}}$  - величина розрідження або вакуум, Па;

$P_{\text{ат}} = 98100$  Па, атмосферний тиск;

$P_{a'}$  - абсолютний тиск, Па.

Після проведення вимірювань у відповідності з параграфом 2 проводять такі обчислення.

1. Надмірний тиск повітря в замкненому об'ємі А над поверхнею води:

$$P_{\text{надм}} = \gamma_v \times h_v,$$

$$P_{\text{надм}} = \gamma_c \times h_c,$$

де  $P_{\text{надм}}$  - надмірний тиск, Па;

$h_v$  - висота підйому води в п'єзометрі 3, або різниця рівнів води в колінах U-подібного диференціального манометра 1, м;

$h_c$  - різниця рівнів спирту в диференціальному манометрі 2, м;

$\gamma_v = 9810$  н/м<sup>3</sup> - питома вага води;

$\gamma_c$  - питома вага спирту (визначають безпосередньо перед заливом манометра 2), н/м<sup>3</sup>.

2. Обчислюємо абсолютний тиск в замкненому повітряному просторі:

$$P_a = P_{\text{ат}} + P_{\text{надм}},$$

де  $P_a$  - абсолютний тиск, Па;

$P_{\text{ат}}$  - атмосферний тиск, Па;

$P_{\text{надм}}$  - надмірний тиск, Па.

3. Величина абсолютного гідростатичного тиску в нижній точці ємності. При цьому заглиблення точки а'' дорівнює  $\Delta h = 0,09$  м.

$$P_{a''} = P_a + \gamma_v \times \Delta h,$$

де  $P_a$  - абсолютний тиск у воді на глибині  $h$ ; Па;

$\gamma_v = 9810$  н/м<sup>3</sup> - питома вага води .

4. Результати обчислень заносимо в таблицю 2.

Протокол випробувань при надмірному тиску

Таблиця 2.

| № дос-лідів | Показання приладів, м |              |              | Надмірний тиск, Па.  |                      |                      | Абсолютний тиск, Па |           |           |             |             |             |
|-------------|-----------------------|--------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|
|             |                       |              |              |                      |                      |                      | В повітрі           |           |           | В рідині    |             |             |
|             | $\Delta h_1$          | $\Delta h_2$ | $\Delta h_3$ | $P_{\text{над} M_1}$ | $P_{\text{над} M_2}$ | $P_{\text{над} M_3}$ | $P_{a_1}$           | $P_{a_2}$ | $P_{a_3}$ | $P_{a''_1}$ | $P_{a''_2}$ | $P_{a''_3}$ |
| 1.          |                       |              |              |                      |                      |                      |                     |           |           |             |             |             |
| 2.          |                       |              |              |                      |                      |                      |                     |           |           |             |             |             |
| 3.          |                       |              |              |                      |                      |                      |                     |           |           |             |             |             |

5. Величина вакууму над поверхнею води в ємності А обчислюється за формулами аналогічним (4) і (5)

$$P_{\text{вак}} = \gamma_{\text{в}} \times h_{\text{в}},$$

$$P_{\text{вак}} = \gamma_{\text{с}} \times h_{\text{с}},$$

де  $P_{\text{вак}}$  - вакуум, розрідження, Па;

$h_{\text{в}}$  - висота підйому води у вакуумметрі 4, або різниця рівнів води в колінах U-подібного диференціального манометра 4, м;

$h_{\text{с}}$  - різниця рівнів спирту в диференціальному манометрі 2, м.

6. Абсолютний тиск в ємності А над поверхнею води.

$$P_{\text{а}} = P_{\text{ат}} - P_{\text{вак}},$$

де  $P_{\text{а}}$  - абсолютний тиск, Па;

$P_{\text{ат}}$  - атмосферний тиск, Па;

$P_{\text{вак}}$  - величина вакууму, Па.

7. Абсолютний тиск в нижній частині ємності

$$P_{\text{а}}'' = P_{\text{а}} + \gamma_{\text{в}} \times \Delta h = P_{\text{ат}} - P_{\text{вак}} + \gamma_{\text{в}} \times \Delta h,$$

де  $P_{\text{а}}$  - абсолютний тиск в точці  $a''$  на глибині  $\Delta h = 0,09$  м, Па;

$\gamma_{\text{в}} = 9810$  Н/м<sup>3</sup> питома вага води;

8. Результат заносимо в таблицю 3.

Протокол випробувань при вимірюванні вакууму.

Таблиця 3.

| № дос-лідів | Показання приладів, м |              |              | Розрідження, Па.   |                    |                    | Абсолютний тиск, Па. |           |           |             |             |             |
|-------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|
|             |                       |              |              |                    |                    |                    | У повітрі            |           |           | У рідині    |             |             |
|             | $\Delta h_1$          | $\Delta h_2$ | $\Delta h_4$ | $P_{\text{вак} 1}$ | $P_{\text{вак} 2}$ | $P_{\text{вак} 4}$ | $P_{a_1}$            | $P_{a_2}$ | $P_{a_4}$ | $P_{a''_1}$ | $P_{a''_2}$ | $P_{a''_4}$ |
| 1.          |                       |              |              |                    |                    |                    |                      |           |           |             |             |             |
| 2.          |                       |              |              |                    |                    |                    |                      |           |           |             |             |             |
| 3.          |                       |              |              |                    |                    |                    |                      |           |           |             |             |             |

Зміст звіту: Мета роботи, опис і схема лабораторної установки, основні розрахункові формули, протокол випробувань, висновки.

### Контрольні питання.

1. Визначення тиску, властивості тиску.

2. Одиниці вимірювання тиску.
3. Основне рівняння гідростатики.
4. Поняття абсолютного і надмірного тиску, поняття вакууму.
5. Прилади для вимірювання тиску.

## Тема 2. Газові суміші.

1. Поняття про газову суміш.
2. Парціальний тиск і парціальний об'єм компонентів газової суміші.  
Закон Дальтона.
3. Способи завдання складу газової суміші.
4. Визначення основних термодинамічних характеристик газової суміші.

**Газова суміш** – це механічна суміш різних газів, які хімічно не реагують між собою. Завдяки хаотичному руху молекул, кожний компонент суміші рівномірно заповнює весь об'єм суміші і поводить себе так, ніби то він один знаходиться в об'ємі, який займає суміш, чинячи при цьому на стінки ємкості свій частковий, іншими словами, парціальний тиск. Таким чином, **парціальний тиск компонента суміші** – це тиск, який мав би даний компонент, якби він один знаходився в об'ємі суміші при температури суміші.

Відповідно закону Дальтона сума парціальних тисків компонентів газової суміші дорівнює тиску всієї суміші.

$$p_{\text{сум}} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i, \text{Па}.$$

Крім парціального тиску розглядають також і **парціальний об'єм компонента газової суміші** – об'єм, який займав би даний компонент, якби він один знаходився під тиском суміші при температурі суміші.

$$V_{\text{сум}} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n = \sum_{i=1}^n V_i, \text{м}^3.$$

Щоб використовувати рівняння стану для газової суміші потрібно знати її уявну газову сталу  $R_{\text{сум}}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ . Для цього потрібно знати склад суміші, який може бути заданим:

$$\text{а) в масових частках } q = \frac{m_i}{m_{\text{сум}}},$$

де  $m_i$  – маса  $i$ -го компонента суміші, кг;

$m_{\text{сум}}$  – маса суміші, кг.

$$\text{б) в об'ємних частках } r_i = \frac{V_i}{V_{\text{сум}}},$$

де  $V_i$  – об'єм  $i$ -го компонента суміші,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\text{сум}}$  – об'єм суміші,  $\text{м}^3$ .

в) в мольних частках  $x_i = \frac{k_i}{k_{\text{сум}}}$ ,

де  $k_i$  – кількість кіломолей  $i$  – го компонента суміші;  
 $k_{\text{сум}}$  – кількість кіломолей суміші.

Між цими частками є чіткий зв'язок:  $r_i = q_i \frac{R_i}{R_{\text{сум}}}$ , а  $r_i = x_i$ .

При задаванні складу суміші в масових частках її уявна газова стала визначається як:

$$R_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n q_i R_i, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

де  $R_i$  – характеристична газова стала  $i$  – го компонента суміші.

При задаванні складу суміші в об'ємних або мольних частках (так як  $r_i = x_i$ ) її уявна газова стала визначається як:  $R_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{R_i}}, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$

Нижче представлені декілька задач, для рішення яких використовується все теж рівняння Клапейрона, яке треба записати для газової суміші.

**Задача №1.** Відпрацьовані гази в ДВЗ мають наступний масовий склад: вуглекислого газу 20 %, кисню 5,5 %, азоту 72,7 %, окису вуглецю 1,8 %. Визначити масову густину цієї газової суміші, якщо її температура 527 °С, а тиск середовища, куди вона випускається, 745 мм рт. ст.

**Рішення:**

$$\text{масова густина суміші: } \rho_{\text{сум}} = \frac{p_{\text{сум}}}{R_{\text{сум}} T_{\text{сум}}} = \frac{745 \cdot 133,3}{274 \cdot 800} = 0,45 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

$$\begin{aligned} \text{Тут: } R_{\text{сум}} &= \sum_{i=1}^n q_i R_i = q_{\text{CO}_2} R_{\text{CO}_2} + q_{\text{O}_2} R_{\text{O}_2} + q_{\text{N}_2} R_{\text{N}_2} + q_{\text{CO}} R_{\text{CO}} \\ &= 0,2 \cdot 189 + 0,055 \cdot 260 + 0,727 \cdot 297 + 0,018 \cdot 297 = 274 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \end{aligned}$$

**Задача №2.** Атмосферне повітря по об'єму складається з 21 % кисню і 79 % азоту. Визначити масову густину повітря при нормальних фізичних умовах ( $p=760$  мм рт. ст.,  $t = 0$  °С).

$$\text{Рішення: } \rho_{\text{сум}} = \frac{p_{\text{сум}}}{R_{\text{сум}} T_{\text{сум}}} = \frac{760 \cdot 133,3}{287 \cdot 273} = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$\text{Тут: } R_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{R_i}} = \frac{1}{\frac{r_{\text{O}_2}}{R_{\text{O}_2}} + \frac{r_{\text{N}_2}}{R_{\text{N}_2}}} = \frac{1}{\frac{0,21}{260} + \frac{0,79}{297}} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

**Задачі для самостійного рішення.**

**Задача №1.** Суміш двох об'ємів водню і одного об'єму кисню називається «грімучим» газом. Визначити об'єм, який займає ця суміш при температурі

+27 °C і барометричному тиску 750 мм рт. ст., якщо її маса дорівнює 2 кг.

**Відповідь:** 4 м<sup>3</sup>.

**Задача №2.** Визначити температуру газової суміші, яка складається з вуглекислого газу з парціальним об'ємом 3,5 м<sup>3</sup> і кисню з парціальним об'ємом 1,5 м<sup>3</sup>, якщо абсолютний тиск складає 0,1 МПа, а її маса 4,85 кг.

**Відповідь:** 500 К.

**Задача №3.** Визначити температуру газової суміші, яка складається з 5 кг вуглекислого газу, 2 кг «чадного» газу і 13 кг азоту, якщо абсолютний тиск суміші складає 0,1 МПа, а її об'єм 21,5 м<sup>3</sup>.

**Відповідь:** 400 К.

### Контрольні питання.

1. Що розуміють під газовою сталою?
2. Що розуміють під парціальним тиском компонента газової суміші?
3. Що розуміють під парціальним об'ємом компонента газової суміші?
4. В чому полягає сутність закону Дальтона?
5. Що розуміють під масовою часткою компонента газової суміші?
6. Що розуміють під об'ємною часткою компонента газової суміші?
7. Як визначити уявну газову сталу суміші?

### Тема 3. Теплоємність газів.

1. Поняття про теплоємність газу.
2. Характерні теплоємності газу (масова, об'ємна, мольна, ізохорна, ізобарна, істинна, середня).
3. Визначення кількості теплоти через теплоємність.
4. Теплоємність газової суміші.

**Теплоємністю** газу (як і будь-якого іншого тіла) називається кількість теплоти, яка необхідна для підвищення його температури на 1 К (на 1 °C).

**Питома теплоємністю** газу називається кількість теплоти, яка необхідна для підвищення у одиниці кількості газу (кг, м<sup>3</sup>, моль) температури на 1 К (1 °C) у даному термодинамічному процесі.

$$Q = mc(t_2 - t_1), \text{Дж},$$

В залежності від того, в яких одиницях представлена кількість газу, визначають:

- а) питому **масову** теплоємність  $C$ ,  $c = \frac{Q}{m\Delta T}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;
- б) питому **об'ємну** теплоємність  $C'$ ,  $c' = \frac{Q}{V_n\Delta T}, \frac{\text{Дж}}{\text{м}_n^3 \cdot \text{К}}$ ;
- в) питому **мольну** теплоємність  $\mu C$ ,  $c_\mu = \frac{Q}{k\Delta T}, \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$ ;

Між цими характерними теплоємностями існує зв'язок:

$$C = \frac{C'}{\rho} = \frac{\mu C}{\mu}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Тут  $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – густина газу (р. т.),  $\mu$  – його молекулярна маса.

В теплотехнічних пристроях часто використовуються процеси, які протікають або при постійному об'ємі  $V=\text{const}$ , або при постійному тиску  $p=\text{const}$ . В зв'язку з цим розглядають:

а) **ізохорну** теплоємність  $C_V, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

б) **ізобарну** теплоємність  $C_P, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

В зв'язку з тим, що теплоємність залежить від температури р. т., часто користується її середнім значенням в даному інтервалі температур  $C_m, C'_m, \mu C_m$  і називається середня теплоємність.

Теплоємність, яка відповідає даній температурі називається *істинною*. Кількість теплоти, витраченої на нагрівання газу, можна представити як:

$$Q = mC_m(T_2 - T_1), \text{Дж, або}$$

$$Q = VC'_m(T_2 - T_1), \text{Дж, або}$$

$$Q = K\mu C(T_2 - T_1), \text{Дж}$$

Теплоємність газової суміші можна визначити як:

$$C_{\text{СУМ}} = \sum_{i=1}^n q_i C_i, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad C'_{\text{СУМ}} = \sum_{i=1}^n r_i C'_i, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$\mu C_{\text{СУМ}} = \sum_{i=1}^n x_i \mu C_i, \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}},$$

де  $q_i, r_i, x_i$  – відповідно масова, об'ємна і мольна частки компонентів суміші.

Нижче представлено ряд задач, рішенням яких є рівняння  $Q = mC_m(T_2 - T_1), \text{Дж}$  і рівняння Клапейрона  $pV = mRT$ .

**Задача №1.** Визначити годинну витрату гарячої води у водяному калорифері для нагрівання  $6500 \text{ м}^3/\text{год}$ . повітря від температури  $-15^\circ\text{C}$  до температури  $+18^\circ\text{C}$ , якщо температура води на вході в калорифер  $95^\circ\text{C}$ , а на виході з нього  $60^\circ\text{C}$ . Барометричний тиск під час роботи калорифера  $750 \text{ мм рт. ст.}$  В розрахунках прийняти: питому масову ізобарну теплоємність повітря  $C_{Pm} = 1,015 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ , а питому масову теплоємність води  $C_{вод} = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

### **Рішення:**

1. Рівняння балансу теплоти для ідеального калорифера.

$$Q_{1\text{вод}} = Q_{2\text{пов}}, \text{кДж/год.}$$

$$m_{\text{ВОД}} C_{\text{ВОД}} \Delta t_{\text{ВОД}} = m_{\text{ПОВ}} C_{Pm} \Delta t_{\text{ПОВ}}, \frac{\text{кДж}}{\text{год}}. \text{ Звідки}$$

$$m_{\text{ВОД}} = \frac{m_{\text{ПОВ}} C_{Pm} \Delta t_{\text{ПОВ}}}{C_{\text{ВОД}} \Delta t_{\text{ВОД}}} = \frac{8775 \cdot 1,015 \cdot 33}{4,19 \cdot 35} = 2005 \frac{\text{кг(гар.вод)}}{\text{год}} \approx 2 \text{ м}^3 \frac{\text{(гар.вод)}}{\text{год}}$$

$$\text{Тут: } m_{\text{пов}} = \frac{PV}{R_{\text{ПОВ}} T} = \frac{750 \cdot 133,3 \cdot 6500}{287 \cdot 258} = 8775 \frac{\text{кг(пов)}}{\text{год}}.$$

$$R_{\text{пов}} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} - \text{уявна характеристична газова стала для повітря.}$$

**Задача №2.** В теплогенераторі гарячими газами нагрівається повітря в кількості  $7400 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$  від температури  $-20^\circ\text{C}$  до температури  $+40^\circ\text{C}$ . Визначити температуру гарячих газів – продуктів згорання дизпалива в повітрі, яке забирається ззовні приміщення, якщо його витрата складає  $310 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ . В розрахунках прийняти  $C'_{\text{Рт пов}} = 1,29 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$ ,  $C'_{\text{Рт газ}} = 1,45 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$ .

**Рішення:**

$$1. Q_{\text{газ}} = Q_{\text{нов}}, \frac{\text{кДж}}{\text{год}}; \quad V_{\text{ГАЗ}} C'_{\text{Рт ГАЗ}} \Delta t_{\text{газ}} = V_{\text{ПОВ}} C'_{\text{Рт ПОВ}} \Delta t_{\text{ПОВ}}.$$

$$\text{Звідки } \Delta t_{\text{ГАЗ}} = \frac{V_{\text{ПОВ}} C'_{\text{Рт ПОВ}} \Delta t_{\text{ПОВ}}}{C'_{\text{Рт ГАЗ}} V_{\text{ГАЗ}}} = \frac{7400 \cdot 1,29 \cdot 60}{310 \cdot 1,45} = 1280^\circ\text{C}.$$

2. В зв'язку з тим,

$$\text{що } \Delta t_{\text{ГАЗ}} = t_{\text{ГАЗ}} - t_{\text{ПОВ}}, \text{ то } t_{\text{ГАЗ}} = \Delta t_{\text{ГАЗ}} + t_{\text{ПОВ}} = 1280 - 20 = 1260^\circ\text{C}.$$

**Задачі для самостійного рішення.**

**Задача №1.** Визначити теплову потужність джерел теплоти (системи опалення) в тваринницькому приміщенні, якщо до нього кожную годину подається  $22000 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$  повітря. Температура повітря ззовні приміщення  $-23^\circ\text{C}$ , а всередині -  $+15^\circ\text{C}$ . В розрахунках прийняти питому об'ємну ізобарна теплоємність повітря  $C'_{\text{Рт}} = 1,29 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$ ;

**Відповідь:** 300 кВт.

**Задача №2.** Змішуються два потоки повітря з різними температурами:  $320^\circ\text{C}$  і  $-20^\circ\text{C}$ . Визначити температуру повітря після змішування цих потоків, якщо витрата гарячого повітря складає  $0,1 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ , а холодного  $0,3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ . Питомі масова ізобарна теплоємність холодного повітря складає  $0,99 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ ; а гарячого  $1,06 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

$$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

**Відповідь:**  $70^\circ\text{C}$ .

**Задача №3.** Яку кількість повітря ( $\frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ ) можна підігріти у водяному калорифері від температури  $-23^\circ\text{C}$  до температури  $+17^\circ\text{C}$ , якщо через калорифер пропускається  $2,5 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$  гарячої води, яка знижує в ньому свою температуру на  $25^\circ\text{C}$ . Питомі об'ємна ізобарна теплоємність повітря  $C'_{\text{Рт}} = 1,29 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ; а питома теплоємність води  $C_{\text{вод}} = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

**Відповідь:**  $5075 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ .

### Контрольні питання.

1. Що розуміють під теплоємністю газу?
2. Які існують характерні теплоємності газу? Зв'язок між ними?
3. Що розуміють під істинною і середньою теплоємністю газу?
4. Як визначити питому масову теплоємність газової суміші, якщо суміш задана масовими частками компонентів?
5. Як визначити кількість теплоти, яка витрачена на нагрівання газу, при різних способах задавання його кількості?

### Тема 4. Перший закон термодинаміки і основні термодинамічні процеси.

1. Сутність 1-го закону термодинаміки та його аналітичний вираз.
2. Основні термодинамічні процеси, що використовуються в теплотехнічних установках.
3. Політропний процес і його узагальнююче значення.
4. Коротка характеристика заданого політропного термодинамічного процесу.

Перший закон термодинаміки являється окремим випадком загального закону збереження і перетворення енергії відносно до процесів взаємного перетворення теплоти і роботи (до процесів, які мають місце в теплових машинах). Він стверджує, що при здійсненні термодинамічного процесу **теплота, що підводиться до робочого тіла, витрачається на зміну його внутрішньої енергії і здійснення роботи проти зовнішніх сил**, тобто

$$Q = \Delta U + L, \text{ Дж (для "m" кг р.т.)}$$

$$\text{або } q = \Delta u + \ell, \text{ Дж (для 1 кг р.т.)}$$

В диференціальній формі цей закон записується як:  $dq = du + d\ell$ , або як  $dq = du + pdv$ , де  $pdv = dl$  – елементарна робота, що здійснюється робочим тілом в даному термодинамічному процесі.

Процес переходу робочого тіла (газу) з одного стану в інший, називається **термодинамічним процесом**.

В термодинамічних пристроях (машинах, двигунах, холодильниках) найбільш часто зустрічаються наступні чотири характерні процеси:

1. **ізохорний** (проходить при незмінному об'ємі робочого тіла,  $v = \text{const}$ );
2. **ізобарний** (проходить при незмінному тиску робочого тіла,  $p = \text{const}$ );
3. **ізотермний** (проходить при незмінній температурі робочого тіла  $p v = \text{const}, T = \text{const}$ );
4. **адіабатний** (проходить без теплообміну з зовнішнім середовищем,  $p v^k = \text{const}$ , де  $k = \frac{C_p}{C_v}$  – показник адіабати;  $C_p$  і  $C_v$  відповідно питомі ізобарна і ізохорна теплоємності р. т.).

Виявляється, що ці чотири термодинамічні процеси є частковими процесами більш узагальнюючого політропного процесу.

$$p v^n = \text{const},$$

де  $n$  – показник політропи – будь-яке ціле чи дробове, позитивне чи від’ємне число, яке вкладається в множину  $-\infty < n < +\infty$ .

Тоді: а) при  $n = 0$ ,  $pv^0 = \text{const} \rightarrow p = \text{const}$  – ізобарний процес;

б) при  $n = 1$ ,  $pv^1 = \text{const} \rightarrow T = \text{const}$  – ізотермний процес;

в) при  $n = k$ ,  $pv^k = \text{const}$  – адіабатний процес;

г) при  $n = \pm\infty$ ,  $pv^\infty = \text{const}$ , або  $p^{\frac{1}{\infty}}v = \text{const}$ , або  $p^0v = \text{const} \rightarrow v = \text{const}$  – ізохорний процес.

Спільний перебіг цих процесів в робочій ( $p-v$ ) і тепловій ( $T-S$ ) діаграмах представлений на рисунку 3.

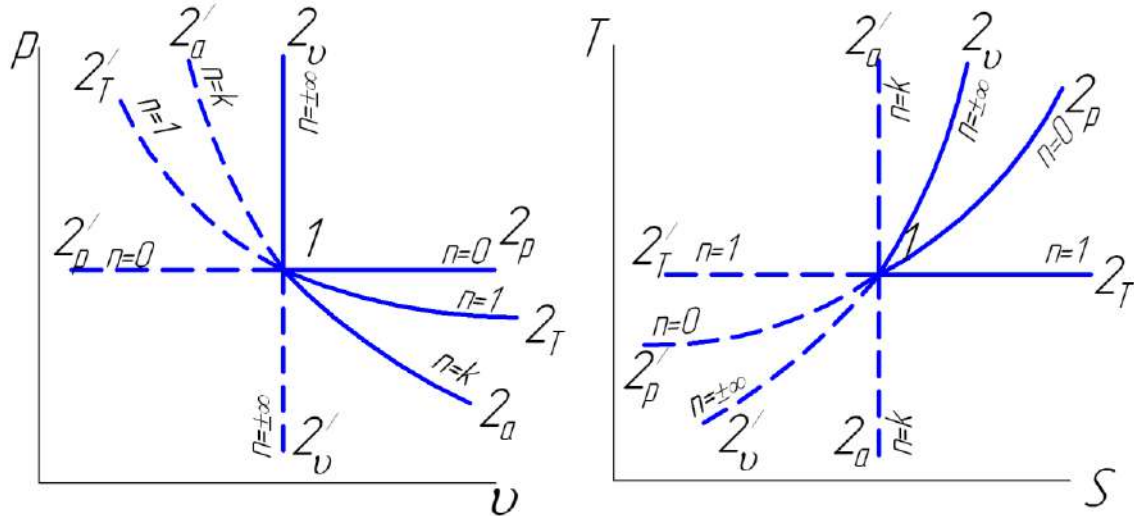


Рис. 3. Спільний перебіг термодинамічних процесів.

Тут процеси: 1– 2 $v$  – ізохорний, 1– 2 $p$  – ізобарний, 1– 2 $T$  – ізотермний, 1– 2 $a$  – адіабатний – процеси розширення,  $dv > 0$ ; 1– 2' $v$  – ізохорний, 1–2' $p$  – ізобарний, 1–2' $T$  – ізотермний, 1–2' $a$  – адіабатний – процеси стисання,  $dv < 0$ .

Знаючи характер процесу (розширення чи стисання) і показник політропи, можна завжди дати коротку якісну характеристику процесу – зміну його основних параметрів та термодинамічних характеристик.

Кількісну оцінку зміни параметрів робочого тіла та характеристик процесів, що виконуються цим тілом, можна розглянути на прикладі задач, які наведені нижче. Рішенням виступають математичні визначення законів Бойля-Маріотта, Шарля, Гей - Люссака, а також для теплоти і роботи, що фігурують в даному процесі.

**Задача №1.** В процесі розширення з підводом 120 кДж теплоти 1 кг повітря здійснює роботу, яка становить 90 кДж. Визначити зміну температури повітря в процесі, прийнявши питому ізохорну середню теплоємність повітря

$$C_{vm} = 0,725 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

#### **Рішення:**

1. Відповідно до 1-го закону термодинаміки  $q = \Delta u + \ell$ , звідки  $\Delta u = q - \ell = 120 - 90 = 30 \text{ кДж}$ .

2. В зв'язку з тим, що  $\Delta u = C_{vm}(T_2 - T_1)$ , то

$$\Delta T = \Delta t = \frac{\Delta u}{C_{vm}} = \frac{30}{0,725} = 41,5^\circ \text{C}.$$

**Задача № 2.** В закритому резервуарі місткістю  $8 \text{ м}^3$  знаходиться повітря при манометричному тиску  $0,1 \text{ МПа}$  і температурі  $27^\circ \text{C}$ . В результаті підігріву температура повітря підвищилася на  $600^\circ \text{C}$ . Визначити кінцеві параметри повітря, кількість теплоти, підведеної до повітря, а також дати оцінку роботі, що здійснюється підігрітим повітрям. Барометричний тиск  $750 \text{ мм. рт. ст.}$ .  
Питома масова ізохорна середня теплоємність повітря  $C_{vm} = 0,725 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ .

**Рішення:**

1. Температура повітря в кінці процесу підігріву:

$$T_2 = T_1 + \Delta T = 300 + 600 = 900 \text{ K або } 627^\circ \text{C}.$$

2. Тиск повітря в кінці підігріву.

Оскільки  $v = \text{const}$ , то згідно закону Шарля  $\frac{P}{T} = \text{const}$ , або  $\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}$ .

Тоді  $P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 0,2 \frac{900}{300} = 0,6 \text{ МПа}$ . Тут  $p_1 = p_{\text{бар}} + p_{\text{ман}} = 0,1 + 0,1 = 0,2 \text{ МПа}$

3. Теплота, яка витрачена на підігрів повітря:

$$Q = m C_{vm}(T_2 - T_1) = 18,6 \cdot 0,725 \cdot 600 = 8091 \text{ кДж}.$$

$$\text{Тут } m = \frac{P_1 V}{R_{\text{пов}} T_1} = \frac{0,2 \cdot 10^6 \cdot 8}{287 \cdot 300} = 18,6 \text{ кг}.$$

4. Оскільки в ізохорному процесі ( $v = \text{const}$ ) об'єм повітря не змінюється, то робота в процесі підігріву  $L = 0$ , кДж.

**Задачі для самостійного рішення.**

**Задача №1.** Дати коротку якісну характеристику політропного термодинамічного процесу розширення, якщо показник політропи  $n = 3$ .

**Задача №2.** Дати коротку якісну характеристику політропного термодинамічного процесу стискування, якщо показник політропи  $n = 2$ .

**Задача №3.** Визначити зміну температури масла при його нагріванні і перемішуванні, якщо відомо його маса  $10 \text{ кг}$ , кількість підведеної до нього теплоти  $200 \text{ кДж}$  і робота, що витрачена на перемішування  $40 \text{ кДж}$ .

Теплоємність масла  $2,0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ .

**Відповідь:**  $12^\circ \text{C}$ .

**Контрольні питання.**

1. Назвіть основні термодинамічні процеси?

2. Рівняння політропного процесу. Як трансформувати його в рівняння інших частинних процесів (ізохорного, ізобарного, ізотермного, адіабатного)?

3. Перебіг основних термодинамічних процесів в робочій і тепловій діаграмах?

4. В якому процесі вся підведена теплота витрачається на зміну внутрішньої енергії, а в якому – на роботу розширення?

5. Чи потрібно підводити теплоту при ізотермічному розширенні робочого тіла?

6. Напишіть рівняння для визначення зміни внутрішньої енергії, ентальпії і ентропії робочого тіла. Розмірності цих величин.

## Тема 5. Другий закон термодинаміки і термодинамічні цикли ДВЗ.

1. Суть другого закону термодинаміки.

2. Поняття про ДВЗ.

3. Теоретичний цикл карбюраторного та інжекторного двигуна.

4. Теоретичний цикл сучасного дизельного двигуна.

5. Робота і ККД циклів.

Другий закон термодинаміки встановлює напрямок ходу мимовільних теплових процесів в природі, а також визначає умови перетворення теплоти в роботу. Відповідно до цього закону теплота в природі переходить від більш нагрітих тіл до менш нагрітих, а для перетворення теплоти в роботу в будь-якому тепловому двигуні необхідно мати два джерела теплоти з різними температурами.

Розташовуючи між ними робоче тіло (повітря, газ), нагріваючи його від джерела з більшою температурою можна, тільки частину одержаної теплоти перевернути в роботу. Другу її частину необхідно обов'язково віддати джерелу з меншою температурою (навколишньому середовищу). При цьому ККД двигуна буде завжди меншим 1,0.

Таким чином, для отримання в великих кількостях роботи необхідно, щоб робоче тіло в двигуні здійснювало, так званий, коловий процес – цикл, тобто замкнутий (коловий) процес, в результаті якого робоче тіло постійно повертається в вихідне положення.

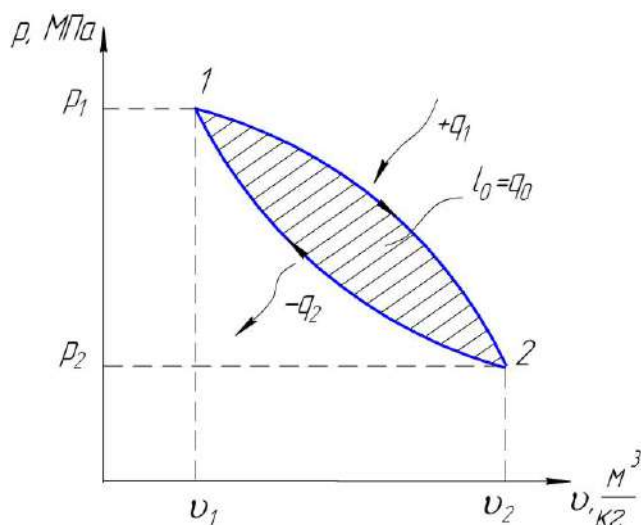


Рис.4. Довільний коловий процес.

Довільний коловий процес представлений на рисунку 4. Тут: 1–2 – процес розширення робочого тіла з підводом теплоти  $q_1$ ; 2–1 – процес стисання робочого тіла з відводом теплоти  $q_2$ . Робота циклу  $\ell_0 = \ell_{розш.} - \ell_{стис.}$ ,  $\frac{Дж}{кг}$ ,  $q_0 = |q_1| - |q_2|$ ,  $\frac{Дж}{кг}$  – ефективно використана в циклі теплота. Очевидно  $\ell_0 = q_0$ ,  $\frac{Дж}{кг}$ . Цикл,

в результаті якого отримується позитивна робота ( $+\ell_0$ ), називається **прямим** циклом (циклом теплових

двигунів). Цикл, в результаті якого витрачається зовні робота ( $-\ell_o$ ), для перенесення теплоти від менш нагрітого тіла до більш нагрітого, називається **зворотнім** циклом (циклом холодильних установок).

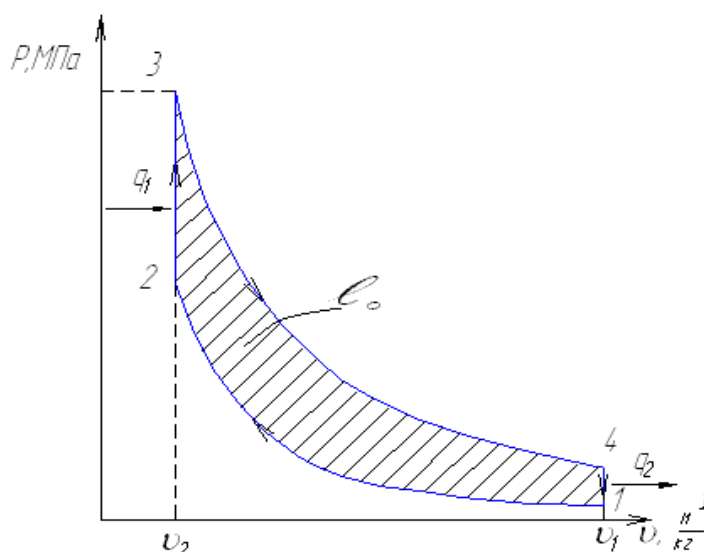
Цикли, які складені з рівновісних обернених процесів, називаються **оберненими** циклами.

Досконалість прямого оборотного циклу оцінюється термічним коефіцієнтом корисної дії  $\eta_t = \frac{\ell_o}{q_o} = \frac{q_o}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$  - який показує, яка частка підведеної в циклі до р.т. теплоти  $q_1$  перетворюється в корисну роботу циклу  $\ell_o$ ,  $\frac{Дж}{кГ}$ .

Досконалість зворотного оберненого циклу оцінюється холодильним коефіцієнтом:  $\varepsilon = \frac{|q_2|}{\ell_o}$ , який показує скільки *Дж* холоду виробляється в циклі холодильної установки при витраті ззовні 1 *Дж* роботи.

Найбільш ефективним циклом теплових двигунів є цикл, який запропонував французький інженер Карно (1824 р). Цей цикл складається з двох ізотерм і двох адіабат (підведення і відведення теплоти виконується по ізотермі). Тільки в такому циклі можна отримати найвищий (але  $< 1$ ) ККД в процесі перетворення теплоти в роботу:  $\eta_{tk} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$  (до 0,8...0,85). В теоретичних реальних теплових двигунів 0,52...0,68. Але реалізувати такий цикл по багатьом причинам не вдалося. Помітно спрощуючи цикл Карно на практиці вдалося реалізувати цикли сучасних карбюраторних і дизельних двигунів.

Найбільш ефективним циклом холодильних установок є зворотний обернений цикл Карно, який складається також з двох ізотерм і двох адіабат (підведення і відведення теплоти виконується також по ізотермам). Тільки в такому циклі можна отримати найвище значення холодильного коефіцієнту



$$\varepsilon_k = \frac{1}{\frac{T_1}{T_2} - 1} \quad (\text{до } 5 \dots 6). \quad \text{В}$$

реальних циклах холодильних машин цей показник помітно менший (2,5...3).

**ДВЗ** – це теплова машина, яка використовує в якості робочого тіла продукти згорання рідкого, або газоподібного палива, яке спалюється безпосередньо

Рис.5. Теоретичний цикл інжекторного або карбюраторного двигуна. всередині циліндра двигуна.

Теоретичний цикл карбюраторного або інжекторного двигунів зображений на рис. 3. Цикл складається з двох адіабат і двох ізохор (адіабата стискування 1-2 → ізохора підводу до робочого тіла теплоти  $q_1$  2-3 → адіабата розширення 3-4 і ізохора відводу теплоти в навколишнє середовище  $q_2$  4-1).

Параметри р. т. в вузлових точках циклу визначається як:

Точка 1):  $p_1, T_1, v_1$  – визначаються по вихідним (заданим) умовам.

Точка 2):  $p_2 = p_1 \varepsilon^k, \text{ МПа}; T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}, \text{ К}; v_2 = \frac{RT_2}{p_2}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$

Точка 3):  $p_3 = p_1 \varepsilon^k \lambda, \text{ МПа}; T_3 = T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda, \text{ К}; v_3 = v_2, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$

Точка 4):  $p_4 = p_1, \text{ МПа}; T_4 = T_1 \lambda, \text{ К}; v_4 = v_1, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}},$

тут:  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$  – ступінь стиску робочого тіла в циклі;

$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$  – ступінь підвищення тиску р. т. в процесі підводу теплоти;

$k$  – показник адіабати (для повітря  $k = 1,4$ );

Досконалість такого циклу прийнято оцінювати термічним коефіцієнтом

корисної дії:  $\eta_{tv} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}};$

Теоретична робота циклу визначається як:  $\ell_o = q_1 \eta_t, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}},$

де  $q_1 = C_{vm}(T_3 - T_2), \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$  – підведена до 1 кг робочого тіла теплота.

Теоретичний цикл сучасного дизельного двигуна зображений на рис. 6.

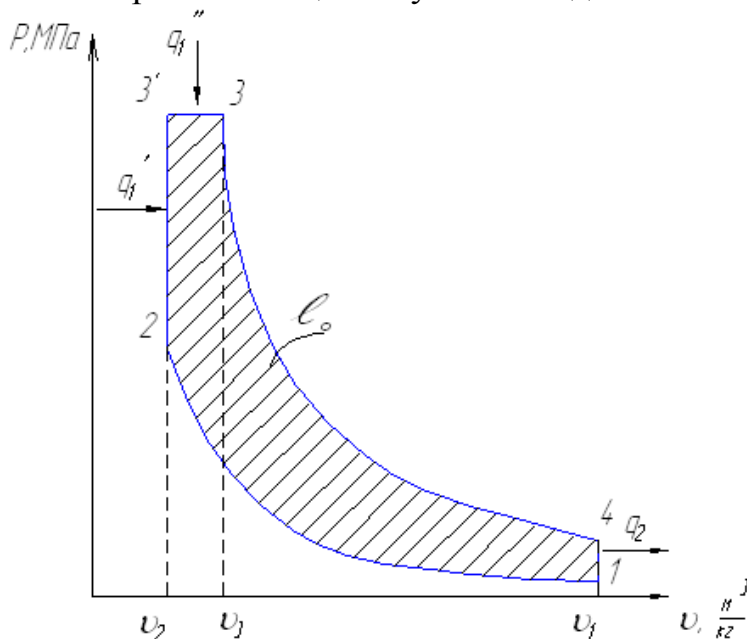


Рис.6. Теоретичний цикл сучасного дизельного двигуна.

Цикл складається з: адіабати стискування 1-2 → ізохори підводу до р. т. теплоти 2-3' → ізобари підводу теплоти  $q_1''$  3'-3 → адіабати розширення 3-4 → ізохори відводу теплоти  $q_2$  в навколишнє середовище 4-1.

Параметри робочого тіла в вузлових точках циклу визначаються як:

Точка 1)  $p_1, T_1, \eta_1$  - по заданим умовам.

Точка 2)  $p_2 = p_1 \varepsilon^k, \text{ МПа}; T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}, \text{ К}; v_2 = \frac{RT_2}{p_2}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$

Точка 3')  $p_{3'} = p_1 \varepsilon^{\kappa} \lambda$ , МПа;  $T_{3'} = T_1 \varepsilon^{\kappa-1} \lambda$ , К;  $v_{3'} = v_2, \frac{m^3}{кг}$ .

Точка 3)  $p_3 = p_{3'}$ , МПа;  $T_3 = T_1 \varepsilon^{\kappa-1} \lambda \rho$ , К;  $v_3 = v_{3'} \rho, \frac{m^3}{кг}$ ;  $p_4 = p_1 \lambda \rho^{\kappa}$ , МПа.

Точка 4)  $T_4 = T_1 \lambda \rho^{\kappa}$ , К;  $v_4 = v_1, \frac{m^3}{кг}$ ,

тут  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ ;  $\lambda = \frac{p_{3'}}{p_2}$ ;  $\rho = \frac{v_3}{v_{3'}}$  – ступінь попереднього розширення р. т. в циклі.

Досконалість такого циклу також оцінюється термічним ККД:

$$\eta_{t_{VP}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^{\kappa} - 1}{(\lambda - 1) + \kappa \lambda (\rho - 1)};$$

Теоретична робота циклу:  $\ell_0 = q_1 \eta_{t_{VP}}, \frac{Дж}{кг}$ ,

$$\text{де } q_1 = q_1' + q_1'' = C_{Vm}(T_{3'} - T_2) + C_{Pm}(T_3 - T_{3'}), \frac{Дж}{кг}.$$

В рамках цього заняття здійснюється видача індивідуального завдання на першу розрахунково-графічну роботу по розрахунку теоретичного циклу ДВЗ (карбюраторного, дизельного) з визначенням потужності і економічності двигуна, який буде „працювати” по розрахованому циклу, і порівнянням його даних з даними двигуна-прототипу.

**Задача №1.** В теоретичному циклі ДВЗ до робочого тіла підводиться (від верхнього джерела теплоти – ВДТ) 1600 кДж/кг теплоти, а відводиться (до нижнього джерела теплоти – НДТ) 240 кДж/кг. Визначити температуру робочого тіла в камері згоряння двигуна, якщо температура навколишнього середовища дорівнює +17 °С. Двигун «працює» по прямому оберненому циклу Карно.

**Рішення:**

$$1. \text{ Термічний ККД циклу: } \eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{240}{1600} = 0,85.$$

В той же час відповідно прямому оберненому циклу Карно:  $\eta_{t_K} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ ,

звідки

$$T_1 = \frac{T_2}{1 - \eta_{t_K}} = \frac{290}{1 - 0,85} = 1995 \text{ К } (1662 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

**Задача №2.** В теоретичному циклу холодильної установки «виробляється» 1800 кДж/кг холоду при витраті ззовні 360 кДж/кг роботи. Визначити температуру в холодильній камері установки, якщо температура навколишнього середовища +22 °С. Установка «працює» по зворотному оберненому циклу Карно.

**Рішення:**

$$1. \text{ Холодильний коефіцієнт циклу: } \varepsilon = \frac{q_2}{\ell_0} = \frac{1800}{360} = 5,0.$$

В той же час відповідно зворотному оберненому циклу Карно:

$$\varepsilon_K = \frac{T_2}{T_1 - T_2}, \text{ звідки } T_2 = \frac{\varepsilon_K T_1}{1 + \varepsilon_K} = \frac{5,0 \cdot 295}{1 + 5,0} = 248 \text{ K } (-25^\circ \text{C}).$$

**Задача №3.** Визначити параметри робочого тіла в характерних точках циклу, роботу і ККД циклу дизельного ДВЗ, якщо початковий тиск і температура робочого тіла  $p_1=0,09 \text{ МПа}$ ,  $t_1=27^\circ \text{C}$ , ступінь стискування робочого тіла  $\varepsilon=16$ ; ступінь підвищення тиску робочого тіла в процесі підводу теплоти  $\lambda=1,7$ ; ступінь попереднього розширення робочого тіла  $\rho=1,6$ . Термодинамічні характеристики робочого тіла:  $C_{pm}=1,015 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ ;  $C_{vm}=0,725 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ ;  $K=1,4$ ;  
 $R=287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ .

**Рішення:** Параметри робочого тіла в вузлових точках циклу:

Точка 1)  $p_1=0,09 \text{ МПа}$ ;  $T_1=t_1+273=27+273=300 \text{ K}$ ;

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 300}{0,09 \cdot 10^6} = 0,96 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Точка 2)  $p_2 = p_1 \varepsilon^k = 0,09 \cdot 16^{1,4} = 4,37 \text{ МПа}$ ;  $T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1} = 300 \cdot 16^{0,4} = 910 \text{ K}$ ;

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{287 \cdot 910}{4,37 \cdot 10^6} = 0,06 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Точка 3')  $p_{3'} = p_2 \lambda = 4,37 \cdot 1,7 = 7,43 \text{ МПа}$ ;  $T_{3'} = T_2 \cdot \lambda = 910 \cdot 1,7 = 1545 \text{ K}$ ;

$$v_{3'} = v_2 = 0,06 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Точка 3)  $p_3 = p_{3'} = 7,43 \text{ МПа}$ ;  $T_3 = T_{3'} \rho = 1545 \cdot 1,6 = 2472 \text{ K}$

$$v_3 = v_{3'} \rho = 0,06 \cdot 1,6 = 0,096 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Точка 4)  $p_4 = p_3 \left( \frac{v_3}{v_4} \right)^K = 7,43 \left( \frac{0,096}{0,96} \right)^{1,4} = 0,3 \text{ МПа}$ ;  $v_4 = v_1 = 0,96 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ ;

$$T_4 = T_3 \left( \frac{v_3}{v_4} \right)^{K-1} = 2472 \left( \frac{0,096}{0,96} \right)^{1,4-1} = 985 \text{ K}.$$

Робота і ККД циклу:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)} = 1 - \frac{1}{16^{0,4-1}} - \frac{1,7 \cdot 1,6^{1,4} - 1}{(1,7 - 1) + 1,4 \cdot 1,7(1,6 - 1)} = 0,65.$$

$$\ell_0 = \eta_t q_1 = 1403 \cdot 0,65 = 912 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

де  $q_1$  – підведена до р. т. теплота:

$$q_1 = q_1' + q_1'' = C_{V_m}(T_{3'} - T_2) + C_{P_m}(T_3 - T_{3'}) =$$

$$= 0,725(1545 - 910) + 1,015(2472 - 1545) = 1403 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

### Задачі для самостійного рішення.

**Задача №1.** У теоретичному циклі ДВЗ до робочого тіла підводиться  $1000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  теплоти, а відводиться в навколишнє середовище  $200 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ . Визначити температуру газів в камері згорання двигуна (ВДТ), якщо температура навколишнього середовища дорівнює  $+27^\circ\text{C}$ . Двигун «працює» по прямому оберненому циклу Карно.

**Відповідь:**  $1500\text{ K}$ .

**Задача №2.** В теоретичному циклі холодильної установки «виробляється»  $1500 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  холоду при витраті ззовні  $300 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  роботи. Визначити температуру в холодильній камері, якщо температура навколишнього середовища  $+27^\circ\text{C}$ . Установка працює по зворотньому оберненому циклу Карно.

**Відповідь:**  $-23^\circ\text{C}$ .

**Задача №3.** Визначити термічний ККД циклу ДВЗ із змішаним підводом теплоти, якщо початкова температура робочого тіла в циклі  $+40^\circ\text{C}$ , а в кінці процесу згорання температура  $1720\text{ K}$ , ступінь стиску 16, а підвищення тиску в процесі першого етапу підводу теплоти (при  $\nu = \text{const}$ ) 1,3. Робоче тіло в циклі - повітря.

**Відповідь:** 0,647.

### Контрольні питання.

1. Який цикл ДВЗ називається теоретичним (ідеальним)?
2. Що розуміють під ступенем стиску в ДВЗ?
3. Причини обмеження ступеню стиску в карбюраторному та дизельному двигунах?

### Лабораторна робота № 3. Вивчення стану відносного спокою рідини.

**Мета роботи:** завершити формування знань щодо стану відносного спокою рідини. Експериментально підтвердити відповідність координат точок вільної поверхні рідини у циліндричній ємності, що обертається, теоретично розрахованим значенням.

#### Завдання:

1. При заданій частоті обертання вертикальної ємності виміряти вертикальну і радіальну координати точок вільної криволінійної поверхні рідини.
2. Для цієї частоти обертання вертикальної ємності вирахувати вертикальну і радіальну координати точок вільної криволінійної поверхні рідини за теоретичними співвідношеннями.
3. Порівняти отримані результати і зробити висновок.

## План

1. Ознайомлення з будовою лабораторної установки ГД-2.
2. Повторення стислих теоретичних відомостей щодо стану відносного спокою в рідині.
3. Тарування фотоелектричного тахометра.
4. Вимірювання координат вільної поверхні.

### **1. Ознайомлення з будовою лабораторної установки ГД-2.**

Схема лабораторної установки ГД-2 представлена на рис. 1. На литому корпусі 1 встановлені: циліндрична посудина, електропривод з органами керування, вимірювальний блок для відліку координат вільної поверхні рідини.

Циліндрична посудина 2 заповнюється до половини об'єму трансформаторним маслом 3 і обертається електродвигуном 4 із черв'ячним редуктором. З теорії відомо, що вільна поверхня рідини в цьому випадку повинна мати форму параболоїда обертання.

В ході експерименту вимірюються координати лінії перетину двох поверхонь:

1) плоскої вертикальної, що проходить через центр обертання; 2) вільної поверхні рідини.

Вимірювальний пристрій складається з: каретки 5 і вимірювальної голки 8. За допомогою рукояток 6 і 7 каретка рухається в горизонтальному і вертикальному напрямках. Величина визначається по шкалам, розміщених горизонтально - на направляючій каретки по обидві сторони штока і вертикально - на поверхні штока з голкою. Точність відліку вертикальних переміщень 0,5 мм. На передню панель установки виведені такі органи керування: регулятор числа обертів 9, стрілочний індикатор тахометра 10, тумблер включення установки в мережу 11, лампочка 12, що сигналізує про включення в мережу.

У ході виконання лабораторних робіт передбачається зміна частоти обертання ємності в межах 60-160 об/хв.

### **2. Повторення стислих теоретичних відомостей щодо стану відносного спокою в рідині**

В інженерній практиці зустрічаються випадки, коли на рідину, крім сил тяжіння діють сили інерції. У разі обертання вертикальної циліндричної посудини, заповненої рідиною на кожен частку рідини діє сила тяжіння, направлена вертикально вниз, і відцентрова сила, нормальна до осі обертання, і яка дорівнює:

$$F_{в.ц.} = m \omega^2 r,$$

де  $m$  - маса, кг;

$\omega$  - кутова швидкість обертання, 1/с;

$r$  - поточний радіус, м.

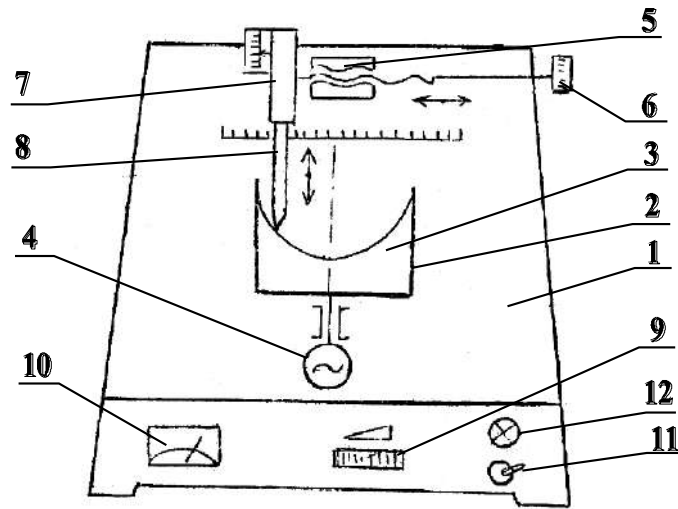


Рис. 7. Схема експериментальної установки.

$$dp = \rho (\omega^2 x dx + \omega^2 y dy - g dz),$$

де  $dp$  - диференціал тиску, н/м<sup>2</sup>;

$dx, dy, dz$  - розміри елементарного об'єму, м;

$\omega$  - кутова швидкість обертання, с<sup>-1</sup>;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  - прискорення вільного падіння

При розміщенні початку координат на вільній поверхні, після інтегрування отримаємо:

$$P_a = P_{a_1} + \rho g z + \frac{\rho \omega^2 r^2}{2},$$

де  $P_a$  - тиск в точці а, Па;

$z, r$  - поточна вертикальна координата і радіус точки

$P_{ат} = 98100 \text{ Па}$  атмосферний тиск.

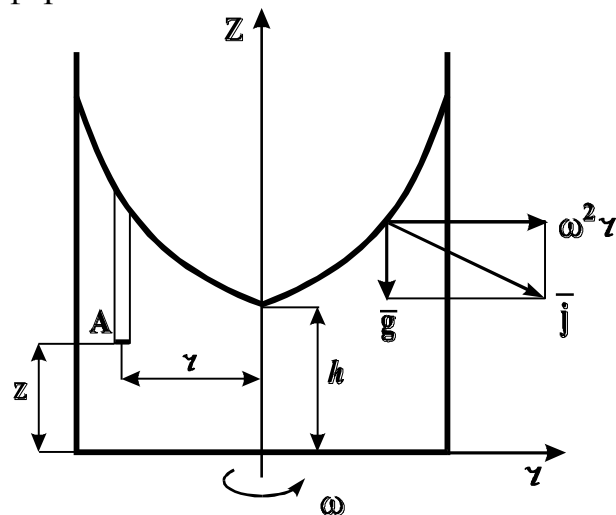


Рис. 8. Поверхня рідини при обертанні відкритої циліндричної ємності.

Рівняння вільної поверхні рідини можна знайти, якщо прирівняти  $P_a = P_{ат}$ .

Після перетворення будемо мати:

$$Z_r = \frac{\omega^2 r^2}{2g},$$

де  $\omega$  - кутова швидкість обертання рідини,  $\text{с}^{-1}$ ;

$Z_{\text{т}}$ - вертикальна координата, теоретичне значення (величина перевищення над найнижчою точкою поверхні рідини).

#### Хід виконання роботи.

### **3. Тарування фотоелектричного тахометра.**

1. Перший етап роботи – тарування фотоелектричного тахометра. Принцип визначення швидкості обертання ємності заснований на вимірюванні величин середнього струму імпульсів фотоструму, частота проходження яких пропорційна числу обертів ротора.

З цією метою на бокову поверхню циліндра наноситься мітка. За допомогою регулятора 9 по черзі встановлюються показання стрілочного приладу на 40, 80, 120, і 160 поділок і за одну хвилину відлічується число обертів ємності.

Кутова швидкість пов'язана з числом обертів таким співвідношенням:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30},$$

де  $n$  - число обертів за хвилину, об/хв.

В ході експерименту потрібно постійно стежити за стабільністю показань приладу. Для підвищення точності вимірювання проводяться до 3-х разів в кожній точці. Результати заносяться в табл. 3.1.

### **4. Вимірювання координат вільної поверхні.**

Включають установку в мережу. Потім регулятором встановлюють бажану частоту обертання (використовуючи дані з табл. 1.) Після того як рідина в ємності прийде в стан відносного спокою по відношенню до стінок посудини, що обертається, проводять вимірювання за допомогою голки. Для цього за допомогою рукоятки 6 голку суміщають з віссю циліндра (відмітка «0» на горизонтальній шкалі).

Потім обертанням рукоятки, розташованої на каретці, вимірювальну голку опускають до контакту її вістря з вільною поверхнею рідини і проводять відлік  $Z_0$  по вертикальній шкалі. Після цього голку підіймають вгору і переміщують в горизонтальному положенні від осі ємності на 1 см і знов опускають до поверхні рідини. Проводять вимірювання  $Z_{\text{шк}}$  вдовж радіуса ємності в 7-8 точках. Результати вимірювань заносять в графі табл. 2.

За базу відліку вертикальних відміток приймають горизонтальну площину, що проходить через найнижчу точку вільної поверхні. Координати вільної поверхні  $Z_{\text{оп}}$  обчислюємо шляхом віднімання від значення координати найнижчої точки  $Z_0$  значень вертикальних координат  $Z_{\text{шк}}$  в інших точках і результат також заносимо до табл. 4.

$$Z_{\text{оп}} = Z_0 - Z_{\text{шк}}$$

Теоретичні значення вертикальних координат  $Z_{\text{т}}$  твірної лінії вільної поверхні знаходимо по формулі (4) і результат заносимо в табл. 5. В останню колонку цієї таблиці заносимо величину розбіжності між координатами теоретично розрахованими і отриманими з дослідів

$$\Delta Z = \frac{Z_{теор} - Z_{оп}}{Z_{оп}} \times 100 \%$$

Наприкінці лабораторної роботи проводять побудову теоретичної і експериментальної ліній в координатах Z-γ, рис. 9.

Таблиця 4.

| Показання приладу | № досліду | n, об/хвил | ω, с <sup>-1</sup> | ср |
|-------------------|-----------|------------|--------------------|----|
|                   | 1         |            |                    |    |
|                   | 2         |            |                    |    |
|                   | 3         |            |                    |    |
|                   | 1         |            |                    |    |
|                   | 2         |            |                    |    |
|                   | 3         |            |                    |    |

Таблиця 5.

| Відстань від точки до осі обертання r, мм | Відмітки вільної поверхні, мм |                 |                          | Розходження ΔZ, % |
|-------------------------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------|-------------------|
|                                           | Z <sub>шк</sub>               | Z <sub>оп</sub> | Z <sub>теор.</sub><br>мм |                   |
|                                           |                               |                 |                          |                   |

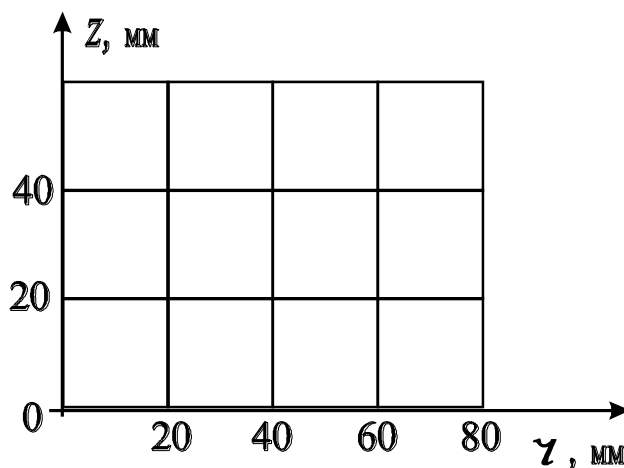


Рис. 9. Графік теоретичної (0) і дослідної (х) твірної ліній вільної поверхні.

У розділі гідродинаміки вивчаються закони руху рідини, як обмеженою твердою поверхнею, так і у вигляді вільного струменя. Основною задачею технічної гідромеханіки є визначення таких фізичних величин, як швидкість, гідродинамічний тиск, опір руху рідини.

В ході виконання лабораторних робіт експериментально визначаються: критерій гідродинамічної подібності, коефіцієнт гідравлічного тертя по довжині трубопроводу, коефіцієнти місцевих опорів, коефіцієнти швидкості і

витрати рідини при витіканні через отвори і насадки.

### **Контрольні питання.**

1. Поясніть, що таке відносний спокій рідини, і наведіть приклади використання цього явища в техніці.
2. Поясніть, що являє собою вільна поверхня рідини в обертовому циліндричному посудині, напишіть рівняння цієї поверхні.
3. Назвіть сили, що діють на кожен частинку рідини в обертовому циліндричному посудині, вкажіть прискорення, що викликаються цими силами. Поясніть відповідь схемою.
4. Напишіть і поясніть закон розподілу гідростатичного тиску по глибині рідини в обертовому резервуарі.
5. Напишіть і поясніть формулу для визначення висоти параболоїди обертання.
6. Зобразіть і прокоментуйте епюру гідростатичного тиску по дну обертового циліндра з рідиною.
7. Напишіть і поясніть закон розподілу гідростатичного тиску по дну циліндра в рідині, що обертається разом з посудиною під-коло вертикальної осі.
8. Які сили діють на рідину, що знаходиться під посудиною обертаючоюся, як виражаються ці сили?
9. Поясніть, як буде спрямований вектор рівнодійної сил, діючих на кожен частку обертової рідини, по відношенню до вільної поверхні.
10. Поясніть, чому вільна поверхня рідини в обертаючійся циліндричній ємності є криволінійною.

### **Лабораторна робота №4. Дослідження режимів течії рідини.**

**Мета роботи:** закріплення знань за розділом "Режими течії рідин", спостереження потоків рідини з різною структурою і придбання навичок по встановленню режиму течії.

#### **Завдання.**

1. Провести візуальне дослідження структури ламінарного і турбулентного потоків.
2. Простежити за зміною картини течії при зміні швидкості потоку.
3. Визначити числа Рейнольдса для спостережуваних потоків.

#### **План**

1. Короткі теоретичні відомості про критерії гідродинамічної подібності.
2. Вивчення будови лабораторної установки ГД-4.
3. Візуальне спостереження різних режимів перебігу рідини.
4. Експериментальне визначення критерію Рейнольдса.

## 1. Короткі теоретичні відомості про критерії гідродинамічної подібності.

Кінематичні і динамічні характеристики потоку в трубі значною мірою залежать від режиму перебігу рідини. Залежно від співвідношень сил інерції і сили тертя в рідині можливі два режими течії.

1. Ламінарний – при шаруватому перебігу цівок рідини. Частинки рухаються уздовж осі труби з різними швидкостями, але не перемішуються.
2. Турбулентний – нестійкий режим з безладним рухом частинок. Разом з основною поступальною ходою потоку уздовж труби спостерігається хаотичні переміщення і вихрові рухи, які приводять до інтенсивного перемішування частинок.

Кількісну характеристику режимів перебігу рідини визначає число Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu},$$

де  $v$  – середня швидкість потоку рідини, м/с;

$d$  – внутрішній діаметр трубопроводу, м;

$\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м<sup>2</sup>/с.

Ламінарний режим течії в круглих трубах спостерігається при числах Рейнольдса від 0 до 2320. Якщо число Рейнольдса більше  $Re=2320$ , то ламінарний режим стає нестійким і вже починаючи з  $Re=4000$  режим стає турбулентним.

## 2. Вивчення будови лабораторної установки ГД-4.

Візуальне спостереження різних режимів течії і експериментальне визначення критеріїв Рейнольдса проводиться на лабораторній установці ГД-4, схема якої приведена на рис. 10.

Основною частиною установки є вертикальна скляна трубка 1, яка підсвічується лампою денного світла 2.

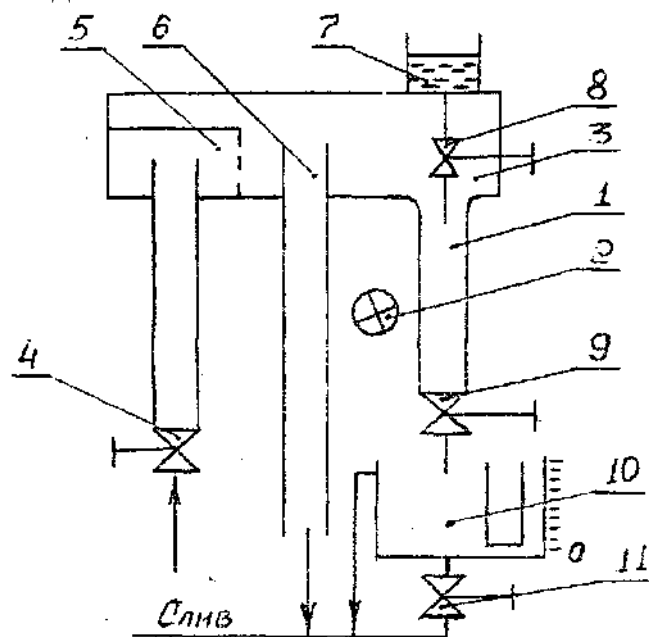


Рис. 10. Схема лабораторної установки.

Під час дослідів вода в установку поступає через вентиль 4 в напірний бак 3. Потім через регулювальний вентиль 11 вода поступає в мірний бак 10. Злив води з мірного бака проводиться за допомогою вентиля 11. Труба 6 призначена для зливу надлишку води з напірного бака 3.

Візуалізація структури потоку виконується при подачі через тонку трубочку з місткості 7 підфарбованою тушшю води. Кількість фарбувальної речовини регулюється; вентилем 8.

#### Порядок виконання роботи

### 3. Візуальне спостереження різних режимів перебігу рідини.

Першим етапом лабораторної роботи є візуальне спостереження структури потоку при одночасній подачі води і фарбувальної речовини в трубку 1. Тут слід звернути увагу на те, щоб потік фарби був як можна меншим і вносив мінімальні обурення в структуру потоку.

Другим етапом є визначення чисел Рейнольдса при різних режимах перебігу води. В ході обчислення критерію  $Re$ , необхідно визначити в'язкість води з таблиці 6, де дані значення коефіцієнта кінематичної в'язкості води залежно від температури.

Таблиця 6.

| $t^{\circ}C$                    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\nu, \frac{m^2}{c} \cdot 10^6$ | 1,39 | 1,35 | 1,31 | 1,28 | 1,24 | 1,21 | 1,18 | 1,15 |

### 4. Експериментальне визначення критерію Рейнольдса.

Внутрішній діаметр скляної трубки рівний  $d = 17 \text{ мм} = 0,017 \text{ м}$ . Як випливає з формули (1), при проведенні дослідів з однією рідиною режим перебігу води можна змінювати варіюючи середню швидкість потоку вентилем 9.

У цій лабораторній, роботі для визначення середньої швидкості використовується найточніший об'ємний метод. Він полягає у тому, що за допомогою мірного бака визначається об'єм води тією, що пройшла через установку:

$$W = S \times h,$$

де  $S = 0,1370,097 = 0,0133 \text{ м}^2$  - площа мірного бака;

$\Delta h = h^K - h^H$  - різниця показчика рівня мірного бака в кінці і початку досліду, м.

Одночасно, з допомогою секундоміра заміряється час наповнення мірного бака, в секундах.

Об'ємна витрата, води рівна:

$$Q_v = \frac{W}{t}, m^3 / c.$$

Тоді середня швидкість потоку води:

$$V_{cp} = \frac{4Qv}{\pi d^2}, \text{ м/с}$$

Остаточню критерій Рейнольдса обчислюється по формулі (1) і всі дані вимірювань і обчислень заносимо в таблицю 7.

Таблиця 7.

| Номер<br>дослі-<br>ду | $t, ^\circ\text{C}$ | $v, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ | $h_H, \text{м}$ | $h_K, \text{м}$ | $\Delta h, \text{м}$ | $V, \text{м}^3$ | $T, \text{с}$ | $Q_v \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ | $v, \frac{\text{м}}{\text{с}}$ | $Re$ |
|-----------------------|---------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------------|------|
| 1.                    |                     |                                  |                 |                 |                      |                 |               |                                   |                                |      |
| 2.                    |                     |                                  |                 |                 |                      |                 |               |                                   |                                |      |
| 3.                    |                     |                                  |                 |                 |                      |                 |               |                                   |                                |      |

В ході проведення роботи рекомендується виконувати 4-5 вимірювань при різних швидкостях перебігу води.

При дуже малій швидкості течії, коли потрібен великий період часу для заповнення мірної місткості, приблизно відповідної числам Рейнольдса до 300, можна скористатися іншим методом визначення середньої швидкості потоку.

Для цього в потік рідини випускається крапля (а не цівка) фарби. Після встановлення режиму течії в центрі трубки чітко виділяється передній фронт руху фарбувальної речовини, відповідний максимальній швидкості ламінарного потоку. Із закону розподілу швидкостей при ламінарній течії в трубах відомо, що  $V_{\max} = 2V_{cp}$

Тому, для визначення найбільшої швидкості слід уздовж скляної трубки розташувати мірну лінійку завдовжки  $l$  і заміряти час проходження переднього фронту, тоді:

$$V_{\max} = \frac{l}{\tau}, \text{ а } V_{cp} = \frac{V_{\max}}{2}$$

Зміст звіту: Мета роботи. Схема установки і її короткий опис. Розрахункові залежності. Таблиця. з результатами експериментів. Висновки

### Контрольні питання:

1. Назвіть можливі режими перебігу рідини.
2. Число Рейнольдса, його фізичне значення.
3. Зв'язок кінематичного і динамічного коефіцієнтів в'язкості, їх розмірності.
4. Розподіл швидкостей по перетину круглого трубопроводу при ламінарному і турбулентному режимах перебігу рідини.
5. Критичне число Рейнольдса, при якому ламінарний режим переходить у турбулентний.

6. Як визначається витрата води в даній роботі?
7. Як впливає температура рідини на число Рейнольдса?
8. Кінематичний і динамічний коефіцієнти в'язкості, їх взаємозв'язок і розмірності.

### **Лабораторна робота № 5. Визначення втрат напору по довжині трубопроводу**

**Мета роботи:** закріплення знань за розділом «Течія рідини в трубах», придбання навичок експериментального та розрахункового визначення втрат напору по довжині при напірній течії рідини».

#### **Завдання:**

1. Визначити втрати напору по довжині каналу дослідним і розрахунковим шляхом.
2. Порівняти отримані результати.

#### **План**

1. Втрати напору по довжині трубопроводу, формула Дарсі-Вейсбаха, графік Нікурадзе.
2. Вивчення будови і принципу роботи універсальної установки ГД-5.
3. Дослідне визначення коефіцієнтів тертя.
4. Розрахунок значень коефіцієнтів тертя за емпіричними залежностями.

#### **1. Втрати напору по довжині трубопроводу, формула Дарсі-Вейсбаха, графік Нікурадзе.**

При русі реальної рідини в трубопроводах з'являються сили опору, які викликаються в'язким тертям. На їх подолання витрачається частина механічної енергії, якою володіє рідина. Питомі втрати енергії (віднесена до одиниці вага рідини) виражаються через втрати натиску по формулі Дарсі-Вейсбаха:

$$h_e = \lambda \frac{l \cdot v^2}{d \cdot 2g},$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт тертя по довжині;  
 $l, d$  - довжина і діаметр трубопроводу, м;  
 $v$  - середня швидкість, м/с;  
 $g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Величина коефіцієнта тертя залежить від режиму перебігу рідини, і від величини мікронерівностей, що при менших значеннях критерію Рейнольдса більший вплив надає режим течії, а при збільшенні числа Рейнольдса - надає шорсткість труб.

У зв'язку з цим розрізняють 5 областей опору (найдокладніша інформація міститься в графіку Нікурадзе):

1 – область ламінарної течії  $R_e < 2320$

2 – перехідний режим  $2320 < R_e < 4000$

3- гідравлічно-гладкі труби  $4000 < R_e < 20 \frac{d}{\Delta}$

4 – не цілком шорсткі. труби  $20 \frac{d}{\Delta} < R_e < 500 \frac{d}{\Delta}$

5 - абсолютно шорсткі труби  $R_e > 500 \frac{d}{\Delta}$ .

У зоні ламінарної течії коефіцієнт тертя залежить тільки від режиму течії і рівний:

$$\lambda_{\text{лам}} = \frac{64}{R_e}.$$

У зоні перехідного і турбулентного режимів течії існує велика кількість емпіричних залежностей (Блазіуса, Конакова, Френеля, Шифрінсона, Нікурадзе, Альштуля). У розрахунковій практиці можна рекомендувати формулу Альштуля, що має точність до 2% для всіх турбулентних режимів:

$$\lambda_{\text{лам}} = 0.11 \left( \frac{\Delta}{d} \right)^{0.25},$$

де  $\Delta$  - еквівалентна шорсткість, м;

$d$  - внутрішній діаметр трубопроводу, м.

## **2. Вивчення будови і принципу роботи універсальної установки ГД-5.**

Лабораторна робота виконується на універсальній установці ГД-5, принципова схема якої зображена на рис. 1. Всі вузли лабораторної установки кріпляться на чавунній станині 1. Погружний відцентровий насос 2 воду з місткості подає в напірний бак 3. Кількість поступаючої води регулюється краном 4. У верхній частині напірного бака встановлена переливна труба 5, а в нижній частині розташований вхід в досліджуваний трубопровід 6. Уздовж труби знаходяться десять штуцерів, сполучених з скляними п'єзометричними трубками 7.

Швидкість перебігу води в трубі регулюється вентилем 8. Для вимірювання об'ємної витрати всередині корпусу 1 встановлений мірний бак 9 з показчиком рівня. Щоб виконати подальший вимір, воду з мірного бака випускаємо через кран 10. Конструкція установки передбачає також вивчення місцевих втрат при раптовому розширенні потоку.

Виконання лабораторної роботи полягає у визначенні коефіцієнтів тертя і в порівнянні їх з розрахунковими значеннями при 3-4 різних середніх швидкостях перебігу води.

## **3. Дослідне визначення коефіцієнтів тертя.**

1. Зміряти температуру води і по таблиці 8 визначити коефіцієнт кінематичної в'язкості води.

2. При сталому рівні води в напірному баку 3 заміряти час наповнення заданого об'єму мірного бака 9.

Об'ємна витрата дорівнює:

$$Q_v = \frac{V}{\tau} = \frac{S\Delta h}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с} ,$$

де  $S = 0.127 \times 0.36 = 0.04572, \text{ м}^2$  - площа мірної місткості:

$h$  - різниця показань рівнеміра в кінці і на початку досліду, м;

$\tau$  - час заповнення, с.

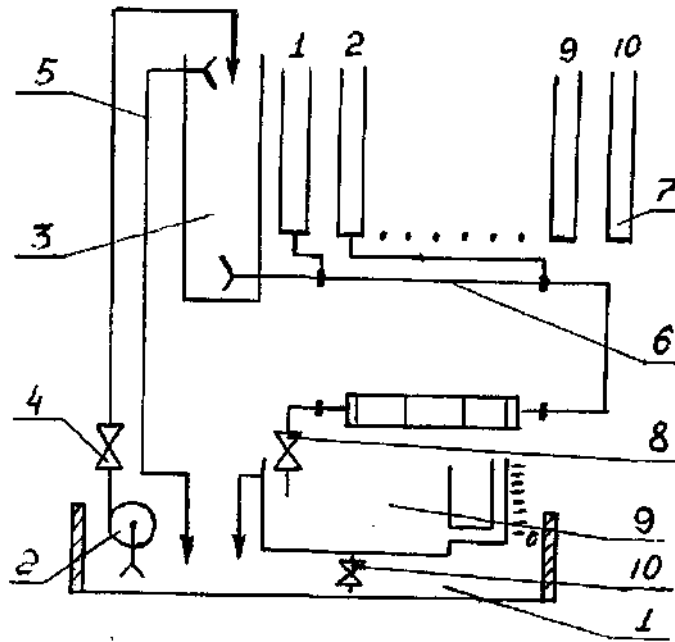


Рис. 11. Принципова схема дослідної установки

3. Середня швидкість течії води:

$$V_{cp} = \frac{4Q_v}{\pi d^2},$$

де  $d = 0,0105 \text{ м}$  - внутрішній діаметр трубопроводу

5. Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V * d}{\nu},$$

6. Визначаємо зону гідравлічних опорів і по відповідній формулі або графіку знаходимо розрахунковий коефіцієнт тертя.

7. По різниці показань п'єзометрів знаходимо втрату натиску по довжині труби:

$$h_{довж} = h_1 - h_2,$$

де  $h_1$  і  $h_2$  - показання п'єзометрів, в м.

8. Дослідне значення коефіцієнта тертя обчислюємо з перетвореної формули Дарсі-Вейсбаха (1):

$$\lambda_{op} = 2gh \frac{d}{lv^2}.$$

9. Підраховуємо розбіжність у відсотках між експериментальними значеннями і розрахунковою величиною розрахунків:

$$\Delta = \frac{\lambda_{op} - \lambda_{розр}}{\lambda} * 100\%.$$

Всі отримані значення заносяться в таблицю 8.

#### 4. Розрахунок значень коефіцієнтів тертя за емпіричними залежностями.

У зоні ламінарної течії коефіцієнт тертя залежить тільки від режиму течії і рівний:

$$\lambda_{лам} = \frac{64}{Re}.$$

У зоні перехідного і турбулентного режимів течії існує велика кількість емпіричних залежностей (Блазіуса, Конакова, Френеля, Шифрінсона, Нікурадзе, Альштуля). У розрахунковій практиці можна рекомендувати формулу Альштуля, що має точність до 2% для всіх турбулентних режимів:

$$\lambda_{лам} = 0.11 \left( \frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0.25},$$

де  $\Delta$  - еквівалентна шорсткість, м;

$d$  - внутрішній діаметр трубопроводу, м.

Таблиця 8.

| НАЙМЕНУВАННЯ ВЕЛИЧИН                                             | НОМЕР ДОСЛІДУ |   |   |
|------------------------------------------------------------------|---------------|---|---|
|                                                                  | 1             | 2 | 3 |
| 1. Температура води, t°C                                         |               |   |   |
| 2. Коефіцієнт кінематичної в'язкості води, $\nu$ , м/с           |               |   |   |
| 3. Різниця рівнів в мірному баку, $\Delta h$ , м                 |               |   |   |
| 4. Час заповнення, $\tau$ , с                                    |               |   |   |
| 5. Витрата, $Q_v$ , м/с                                          |               |   |   |
| 6. Середня швидкість, $V$ , м/с                                  |               |   |   |
| 7. Число Рейнольдса, $Re$                                        |               |   |   |
| 8. Коефіцієнт гідравлічного тертя розрахунковий, $\lambda$ расч. |               |   |   |
| 9. Втрата натиску по довжині, $h_{дл}$ , м                       |               |   |   |
| 10. Коефіцієнт тертя (дослідний), $\lambda$ оп                   |               |   |   |
| 11. Відхилення результатів, % $\Delta$                           |               |   |   |

#### Контрольні питання

1. Фізичне значення коефіцієнта тертя, формула Дарси-Вейсбаха.
2. Залежність коефіцієнта тертя від режиму перебігу рідини. Графік Нікурадзе.
3. Межі областей опору.

4. Пояснити поняття «гідравлічно-гладкі труби» і «гідравлічні шорсткі труби».

5. Які величини повинні бути відомими при визначенні критерію Рейнольдса?

6. Яким чином визначається середня швидкість у трубі?

7. Від чого залежить величина коефіцієнта опору тертя по довжині трубопроводу?

8. Перелічити режими течії рідини. Які значення числа Рейнольдса характеризують кожен із режимів?

9. Від чого залежать втрати енергії по довжині трубопроводу?

10. Чи впливає відносна шорсткість стінок труби на втрати енергії по довжині трубопроводу?

11. Чи впливає в'язкість рідини, що перекачується, на режим течії в трубі?

### **Лабораторна робота №6. Дослідження місцевих гідравлічних опорів.**

Мета роботи: закріплення знань з розділу "Міцеві гідравлічні втрати", отримання навичок експериментального визначення втрат напору на місцевих опорах і зіставлення дослідного коефіцієнта опору з обчисленим по теоретичній залежності.

#### **Завдання:**

Визначати втрати напору на вході в канал, на розширення і звуження каналу дослідним шляхом і порівняти їх з розрахованими по інженерних формулах.

#### **План**

1. Повторення основних теоретичних положень при визначенні коефіцієнту втрати напору при раптовому розширенні трубопроводу .

2. Переналадка установки ГД-5 на визначення втрат напору при раптовому розширенні потоку.

3. Проведення вимірів: температури води, різниці рівнів в мірному баку, час заповнення баку, різниця показань п'єзометрів, втрата напору (дослідне значення).

4. Виконання розрахунків: по величині температури води визначити коефіцієнт кінематичної в'язкості води, а також витрати води, середньої швидкості, числа Рейнольдса, коефіцієнту опору, теоретичного, коефіцієнту опору, дослідного.

5. Зіставлення дослідного коефіцієнта опору з обчисленим по теоретичній залежності.

#### **1. Повторення основних теоретичних положень при визначенні коефіцієнту втрати напору при раптовому розширенні трубопроводу .**

Будь-яка зміна швидкості або напрямку потоку рідини приводить до місцевих втрат напору, обумовленим роботою сил тертя. У водопровідних мережах це можуть бути повороти, раптові або плавні зміни перетину трубопроводу, відведення, мірні пристрої, арматура і т.п.

У загальному випадку величина місцевих втрат натиску визначається по формулі Дарсі:

$$hm = \xi m \frac{V^2}{2g},$$

де  $\xi m$  - коефіцієнт місцевого опору;  $\frac{V^2}{2g}$  - швидкісний напор, віднесений до середньої швидкості у вузькій частині потоку, м.

Коефіцієнт місцевих опорів залежать від режиму течії рідини (критерію Рейнольдса) тільки при ламінарному потоці. Для турбулентного режиму значення коефіцієнтів опору залежать тільки від виду місцевої зміни потоку.

Найзручніше проводити дослідження місцевих втрат напору при раптовому розширенні потоку рідини, оскільки є можливість теоретичного визначення величини втрат напору.

## 2. Переналадка установки ГД-5 на визначення втрат напору при раптовому розширенні потоку.

Лабораторна робота виконується на установці ГД-5, описаній в попередній роботі № 2. При виконанні цієї роботи стає задіяною ділянка випробовуваного трубопроводу 6 між точками 4-7 вимірювання п'єзометричного напору. Схема перебігу рідини і вимірювання напору на цій ділянці зображена на рис. 12.

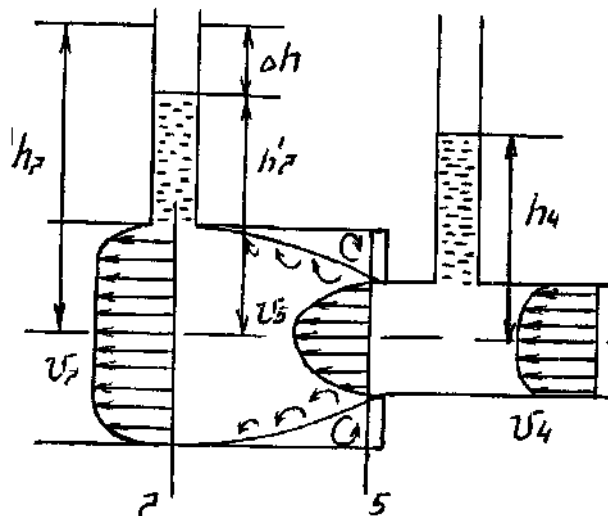


Рис. 12. Схема виникнення втрат напору при раптовому розширенні потоку.

У разі течії по випробовуваному трубопроводу ідеальної рідини показання п'єзометра до розширення мало б значення  $h_4$ . Після збільшення перетину потоку, а значить і зменшень швидкісного натиску відповідно до рівняння Бернуллі, показання п'єзометра повинні бути  $h_7$ . Для реальної рідини п'єзометрична висота  $h_7$  унаслідок сил тертя буде менше, а  $\Delta h$  складе величину втрат напору при раптовому розширенні.

З теоретичної формули Борда виходить, що:

$$\Delta hm = \frac{(V_4 - V_7)^2}{2g},$$

де  $V_4 - V_7$  середні швидкості в потоці до і після розширення, м/с.

Таким чином, втрата напору рівна швидкісному натиску «втраченої» швидкості. При раптовому розширенні турбулентний потік, що виходить з вузької частини трубопроводу, продовжує рухатися за інерцією, поступово розширюється і лише на певному віддаленні (приблизно рівному десяти внутрішнім діаметрам) знову заповнює весь перетин. На цій ж відстані також відбувається відновлення профілю епюри швидкостей, відповідного турбулентному режиму руху. Між струменем рідини і стінками розширеної частини трубопроводу розташовується тороїдальна вихрова зона. Взаємодія вихрової зони і основного струменя потоку відбувається з витратою енергії на утворення крупних вихорів в транзитному потоці. Далі під дією сил тертя відбувається розпад вихорів на дрібніші, тим самим збільшується ступінь перемішування частинок рідини. І зрештою, механічна енергія перетвориться в теплову енергію, що приводить до зменшення питомої механічної енергії (напору).

У загальному випадку величина  $h$  визначає втрати не тільки в місці різкого збільшення перетину трубопроводу, але і по довжині ділянки 4-7 стабілізації потоку. Але оскільки довжина  $l$  відносно невелика, то втрати по довжині особливо не виділяють, а включають в сумарний коефіцієнт.

Порядок виконання роботи.

**3. Проведення вимірів: температури води, різниці рівнів в мірному баку, час заповнення баку, різниця показань п'єзометрів, втрата напору (дослідне значення).**

Перші чотири пункти виконання роботи аналогічні початковій частині роботи № 8.

1. По величині температури води визначити коефіцієнт кінематичної в'язкості води.

2. Заміряти час наповнення мірного бака 9 на задану висоту.

**4. Виконання розрахунків: по величині температури води визначити коефіцієнт кінематичної в'язкості води,**

а також витрати води, середньої швидкості, числа Рейнольдса, коефіцієнту опору, теоретичного, коефіцієнту опору, дослідного.

Об'ємна витрата дорівнює:

$$Q_v = \frac{0.04572 \cdot \Delta h}{\tau}.$$

3. Середня швидкість течії води у вузькій частині трубопроводу:

$$V_4 = \frac{4Q_v}{\pi d_4^2},$$

де  $d=0,0105$  м - внутрішній діаметр трубопроводу.

4. Число Рейнольдса:  $Re = \frac{V_4 d_4}{\nu}.$

5. Середня швидкість потоку після раптового розширення:

$$V_7 = \frac{4Q_v}{\pi d_7^2},$$

де  $d_7 = 0,021$  м - внутрішній діаметр розширеної частини трубопроводу.

6. Втрати напору по теоретичній формулі Борда.

7. Різниця показань п'єзометрів

$$h = h_4 - h_7.$$

8. Дослідне значення втрат напору:

$$h = h + \frac{(v^4 + v^7)^2}{2g}.$$

9. Відсоток відхилення:

$$\frac{h_m - h_o}{h_o} \times 100\%.$$

10. Коефіцієнт опору теоретичний:

$$\xi_{mt} = \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2.$$

11. Коефіцієнт опору дослідний:

$$\xi_{on} = \frac{2g\Delta h}{V_4^2}.$$

12. Відсоток відхилення коефіцієнта опору

$$\frac{\xi_T - \xi_{on}}{\xi_{on}} \cdot 100\%.$$

## 5. Зіставлення дослідного коефіцієнта опору з обчисленим по теоретичній залежності

Дані дослідів і розрахунків занесемо в таблицю 9.

Таблиця 9.

| НАЙМЕНУВАННЯ ВЕЛИЧИН                             | НОМЕР ДОСЛІДУ |   |   |
|--------------------------------------------------|---------------|---|---|
|                                                  | 1             | 2 | 3 |
| 1. Різниця рівнів в мірному баку, $\Delta h$ , м |               |   |   |
| 2. Час заповнення, $\tau$ , с                    |               |   |   |
| 3. Витрата води, $Q_v$ , м <sup>3</sup> /с       |               |   |   |
| 4. Середні швидкості, $V_4$ , м/с, $V_7$ , м/с   |               |   |   |
| 5. Число Рейнольдса, $Re$                        |               |   |   |
| 6. Втрати напору теорет. $h_t$ , м               |               |   |   |
| 7. Різниця показань п'єзометрів, $h_4 - h_7$ , м |               |   |   |
| 8. Втрати напору (дослідне значення) $h_d$ , м   |               |   |   |
| 9. Коефіцієнт опору, теоретичний, $\xi_{теор}$   |               |   |   |
| 10. Коефіцієнт опору, дослідний, $\xi_d$         |               |   |   |
| 11. Різниця значень втрат натиску, %             |               |   |   |
| 12. Різниця значень коефіцієнтів опору, %        |               |   |   |

## Контрольні питання.

1. Види місцевих опорів.
2. Залежність коефіцієнтів опору від режиму течії рідини.

3. Рівняння Бернуллі для реальної рідини. Взаємозв'язок формули Борда і рівняння Бернуллі.

#### Тема 8. Водяна пара і теоретичні цикли ПСУ.

1. Поняття про процес пароутворення і отримання водяної пари промислового призначення.
2. Перебіг процесу пароутворення в робочій і тепловій діаграмах.
3. Загальне уявлення про побудову ентальпійно – ентропійної ( $i-s$ ) діаграми для водяної пари і її використання в інженерних розрахунках.
4. Поняття про паросилову установку (ПСУ) і принцип її роботи.
5. Цикл Ренкіна – основний теоретичний цикл сучасних ПСУ. Робота і ККД циклу.

В якості робочого тіла водяна пара знаходить широке використання в парових турбінах, які є основними тепловими двигунами на теплових і атомних електростанціях. Вона також широко застосовується в різних технологічних процесах в багатьох галузях виробництва в тому числі і сільському господарстві (опалення, кормоприготування, пастеризація і інші).

Процес переходу води з рідкого стану в пар – газоподібний називається **пароутворенням**.

Для промисловості інтерес представляє процес отримання пари кипінням (випарюванням з об'єму) води при постійному тиску  $p = \text{const}$ .

Відповідно до формули Руша (німецький інженер) температура кипіння:

$t_s = 100 \sqrt[4]{p}, ^\circ\text{C}$  тут  $p$  – абсолютний тиск в  $\text{атм}$ . Як видно, при збільшенні тиску  $t_s$  – також збільшується. Так, наприклад, при тиску 16  $\text{атм}$ . температура кипіння води буде становити 200  $^\circ\text{C}$ .

Для процесу пароутворення всі параметри води, яка почала закипати, звичайно позначають відповідною буквою з штрихом. Всі параметри сухої насиченої пари (остання крапля води випарувалась) позначають тими ж буквами з двома штрихами. Суміш пари з крапельками рідини називається **вологонасиченою парою**, стан якої характеризується ступенем сухості пари:

$$x = \frac{m_{\text{сух}}}{m_{\text{вол}}} = \frac{m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}} + m_{\text{рід}}} \cdot 100\%.$$

Тут:  $m_{\text{сух}}$  – маса сухої пари;

$m_{\text{вол}}$  – маса вологої пари;

$m_{\text{рід}}$  – маса рідини в 1кг суміші.

Параметри такої пари відзначаються індексом  $x$ .

Очевидно, що для починаючої кипіти рідини  $x = 0$ , а для сухої насиченої пари  $x = 1$  (або 100%). Пару при температурі більшій, чим температура кипіння, називають **перегрітою парою**. Різниця між цими температурами називається **ступенем перегріву пари**.

Перебіг процесу пароутворення в діаграмі  $p - v$  і  $T - S$  координат при різних тисках.  $p_3 > p_2 > p_1$  показаний на рисунку 13.

Тут  $t''a''$  – відповідає стану води, як рідини;  
 $t''b''$  – стану води, що починає кипіти;  
 $t''x''$  – стану вологої насиченої пари;  
 $t''c''$  – стану сухої насиченої пари;  
 $t''d''$  – стану перегрітої пари.

Якщо з'єднати (на діаграмах) точки „ $b''$ ”, то можна одержати, так звану, нижню граничну криву  $KM$ , що поділяє області рідини і вологої насиченої пари.

Якщо з'єднати точки „ $c''$ ”, то одержимо, так звану, верхню граничну криву  $KN$ , що поділяє області вологої насиченої пари і перегрітої пари.

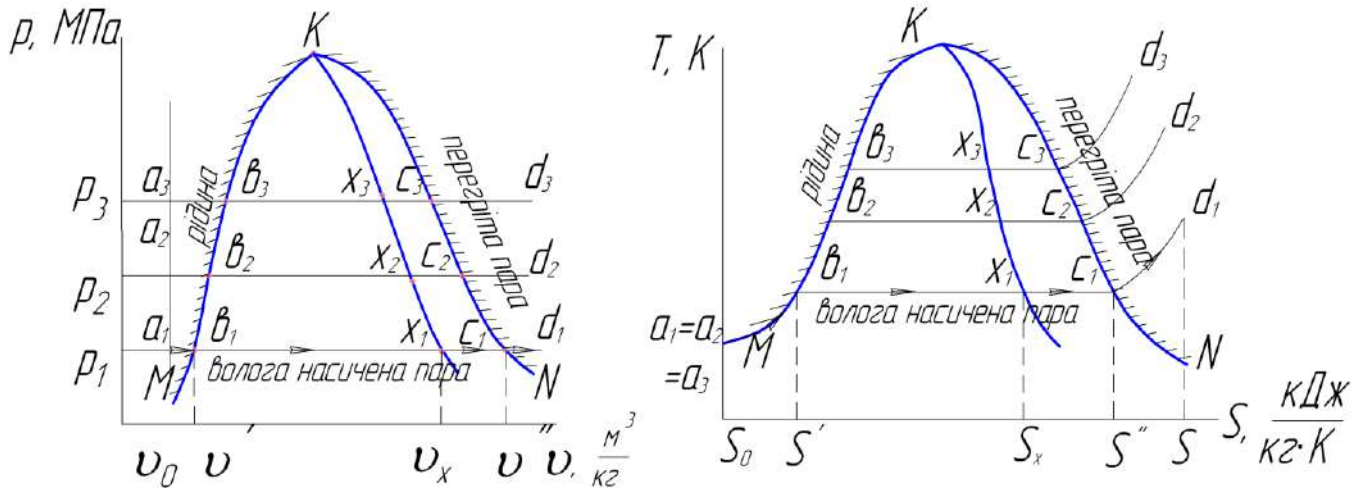


Рис.13. Перебіг процесу пароутворення при різних

Точка  $K$  (в якій перетинаються граничні криві) називають **критичною точкою** води і водяної пари. В цій точці зникає різниця між рідиною (водою) і водяною паром. Критичні параметри для води: тиск  $p_{кр} = 22,1 \text{ МПа}$ ;  $t_{кр} = 374 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

$$v_{кр} = 0,00315 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

На діаграмі  $T-S$  координат точки „ $a''$ ” зливаються в одну точку, яка знаходиться на осі температур, де  $T = 273 \text{ К}$ . На цій діаграмі також видно як будуються граничні криві  $KM$  і  $KN$  і де знаходиться критична точка „ $K''$ ”.

Таким чином, з точки зору термодинаміки процес **пароутворення** – ізобарний процес, який в області вологої насиченої пари є одночасно і ізотермним процесом.

В інженерній практиці термодинамічні процеси з водяною паром розраховують за допомогою, так званої, ентальпійно – ентропійної діаграми для водяної пари. Ця діаграма побудована по знайденим розрахунково – дослідним даним (до тиску  $100 \text{ МПа}$  і температури  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Маючи всі дані ( $p, t, v, x, i, s$ ) для характерних точок процесу пароутворення ( $a, b, x, c, d$ ), можна побудувати ізобари (для різних тисків), ізотерми (для різних температур), ізохори (для різних питомих об'ємів), лінії постійних ступенів сухості вологої насиченої пари. Горизонталі на цій діаграмі – це ізоентальпії ( $i = \text{const}$ ). Вертикалі – це ізоентропи ( $S = \text{const}$ ), або адіабати.

Якщо знайти на  $i-s$  діаграмі для водяної пари початкову (1) і кінцеву (2) точки термодинамічного процесу і зняти по відповідним шкалам основні

параметри пари ( $p, t, v, x, i, s$ ), то можна визначити і всі основні характеристики будь-якого термодинамічного процесу, що виконує водяна пара.

Пам'ятаючи, що ентальпія пари  $i = u + pv$ , а звідси  $u = i - pv$ , можна визначити зміну внутрішньої енергії пари як:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (i_2 - p_2 v_2) - (i_1 - p_1 v_1), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Потім знайти теплоту, що фігурує в процесах:

- ізохорному ( $v = \text{const}$ ),  $q = \Delta u, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;
- ізобарному ( $p = \text{const}$ ),  $q = \Delta^3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;
- ізотермному ( $T = \text{const}$ ),  $q = T\Delta s, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;
- адіабатному ( $pv^k = \text{const}$ ),  $q \equiv 0, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

Показник адіабати  $\kappa=1,3$  для перегрітої пари і  $\kappa=1,035+0,1x$  – для вологої пари. Також для любого процесу можна визначити і роботу, що здійснює пара:

$$\ell = q - \Delta u, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Зміни ентальпії і ентропії в конкретному процесі очевидні:

$$\Delta^3 = i_2 - i_1, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \Delta S_2 = S_2 - S_1, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

**ПСУ** – це сукупність пристроїв, в яких проходять процеси перетворення теплоти, отриманої при згорянні палива, в механічну роботу (на валу парової турбіни), яка витрачається на привід її споживача (електрогенератора). Робочим тілом в ПСУ є вода, яка перебуває в установці, то в рідинному, то в пароподібному стані. Схема ПСУ зображена на рисунку 14.

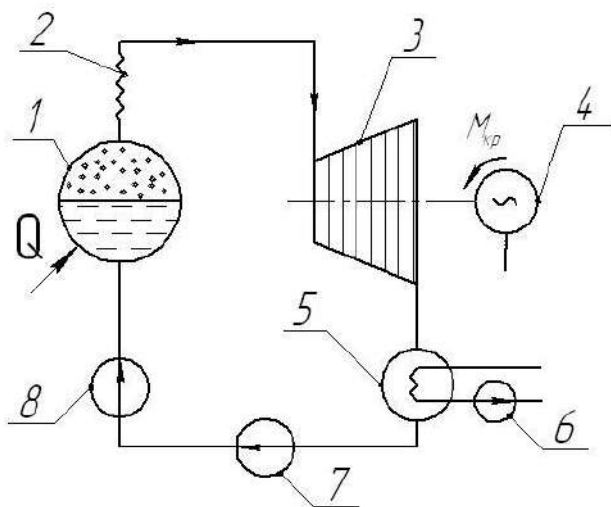


Рис.14. Схема ПСУ.

За допомогою живильного насоса 8 вода поступає в котел 1. За рахунок теплоти  $Q$  гарячих газів, одержаних при згорянні палива і які обминають котел, вода нагрівається до кипіння і випаровується. Волога насичена пара подається в пароперегрівач 2, де вона підсушується і підігрівається до високої температури, а потім подається в парову турбіну 3. На лопатках соплового апарату, а потім і робочого колеса парової турбіни пара розширюється і змушує обертатись вал турбіни, який з'єднаний з електрогенератором 4.

Відпрацювавши в турбіні (знизивши свій тиск і температуру) пара попадає в конденсатор 5, де кондиціонує (становиться рідиною), а потім за допомогою

конденсаційного насоса 7 і потім живильного насоса 8 повертається в котел ПСУ.

Циркуляційний насос 6 забезпечує подачу ззовні холодної води для охолодження поверхонь, на яких і конденсується пара.

Сьогодні найбільше поширення в організації роботи і експлуатації ПСУ одержав теоретичний цикл Ренкіна (шотландський інженер), в якому найбільш ефективно використовується пара, перегріта до високої (500...550 °С) температури при тиску 150...180 і більше атмосфер.

Нижче на діаграмах  $p-v$  і  $T-S$  координат (рисунок 15) зображений цей цикл і його складові термодинамічні процеси.

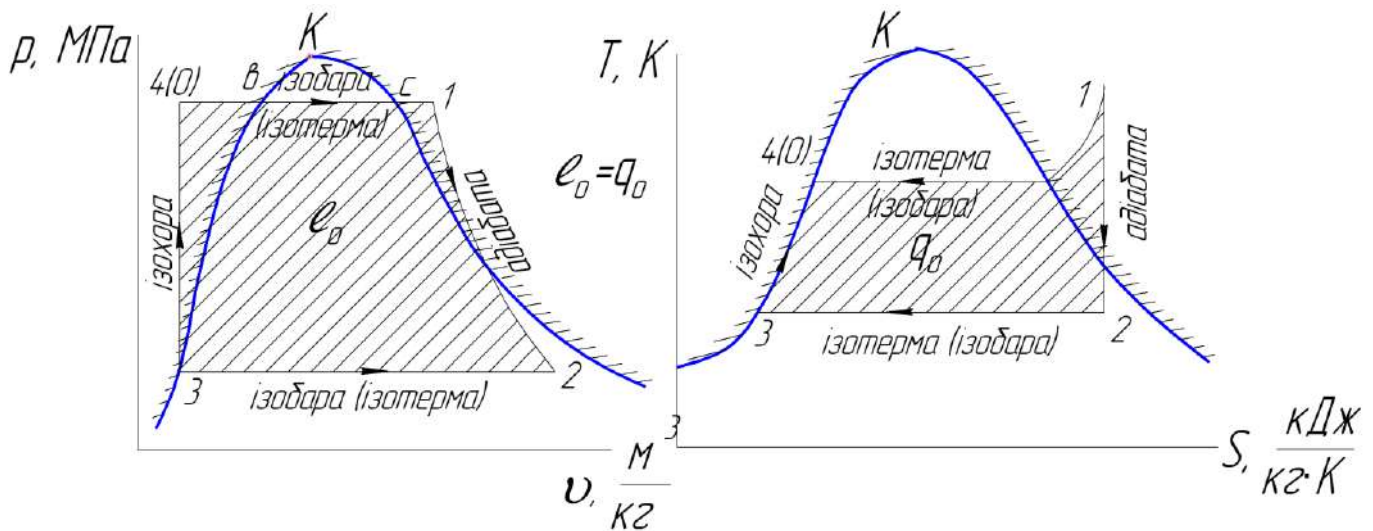


Рис.15. Цикл ПСУ в  $p-v$  і  $T-S$  координатах.

Тут: 4-в-с-1 – ізобарний процес отримання перегрітої пари (в області вологої насиченої пари в-с – він же є ізотермним);

1-2 – адіабатний процес розширення пари в паровій турбіні;

2-3 – ізобарно – ізотермний процес конденсації пари в конденсаторі;

3-4 – ізохорний процес подачі води в котел живильним насосом.

Очевидно, що в теоретичному циклі робота циклу  $\ell_0 = q_0 = q_1 - q_2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ,

де  $q_1$  – підведена, а  $q_2$  – відведена теплота.

Так як при  $p = \text{const}$ ,  $q = \Delta i$ ,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ , то  $q_1 = i_1 - i_3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ , а  $q_2 = i_2 - i_3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

Отже робота циклу:  $\ell_0 = i_1 - i_3 - (i_2 - i_3) = i_1 - i_2, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

Тоді термічний ККД циклу:  $\eta_t = \frac{\ell_0}{q_1} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_3}$ .

Для циклів сучасних ПСУ  $\eta_t = 0,4...0,44$ . В якості характеристики циклу може виступити і питома витрата пари  $d = \frac{1}{\ell_0}, \frac{\text{кг}(\text{пар})}{\text{кДж}}$ , або  $d' = \frac{1}{\ell_0^1}, \frac{\text{кг}(\text{пар})}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$ .

Тут  $\ell'_0 = \frac{\ell_0}{3600} \cdot \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$  (враховуючи те, що  $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3600 \text{ кДж}$ ).

Якщо відома питома витрата пари в ПСУ, то можна при заданій її потужності  $N_e$ ,  $\text{кВт}$  визначити і потрібну витрату пари в  $\text{т/год}$ :

$$D = N_e d', \frac{\text{кг(пар)}}{\text{год}}, \frac{\text{т(пар)}}{\text{год}}.$$

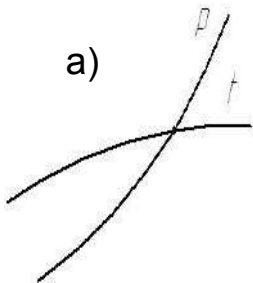
Для підвищення ККД теоретичного циклу ПСУ необхідно:

1. підвищувати тиск і температуру пари на вході в парову турбіну;
2. зменшувати тиск пари за турбіною;
3. удосконалювати цикл за рахунок проміжного перегріву пари підігріву води на вході в котел, підігріву повітря на вході в топку котельного агрегату.

**Задача №1.** За допомогою  $i$ - $s$  діаграми для водяної пари визначити параметри (яких не вистачає) пари, якщо задані:

а)  $p = 5 \text{ МПа}$ ,  $t = 500^\circ \text{C}$

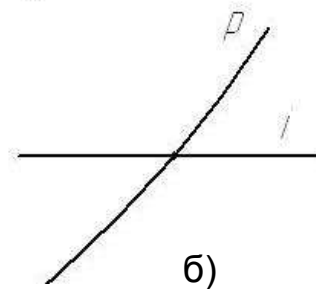
Відповідь:  $i = 3430 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;  $s = 6,97 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ ;  $v = 0,072 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$



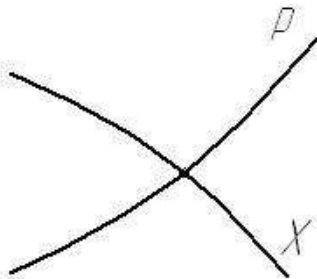
б)  $p = 1,0 \text{ МПа}$ ,

$i = 3600 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

Відповідь:



$S = 7,92 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ ,  $t = 555^\circ \text{C}$ ,  $v = 0,4 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$



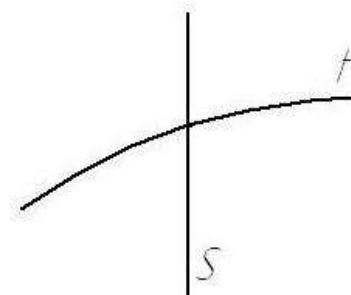
т = в)  $1^\circ \text{C}$ ,  $i = 2640 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

$v = 0,37 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ ,  $S = 6,57 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$

в)  $p = 0,5 \text{ МПа}$ ,  $x =$

Відповідь:

0,95



г)  $S = 7,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ ,  $t = 350^\circ \text{C}$

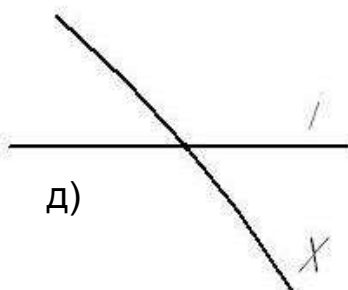
Відповідь:  $i = 3160 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ,  $p = 0,65 \text{ МПа}$ ,  $v = 0,45 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$

д)  $t = 150^\circ \text{C}$ ,  $x = 0,95$ ,

Відповідь:

$p = 0,475 \text{ МПа}$ ;

$i = 2430 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;



$$S = 6,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, v = 0,3 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

**Задача №2.** Визначити годинну витрату палива через топку котельного агрегату (КА) паропродуктивністю  $D = 4 \frac{\text{т(пар)}}{\text{год}}$ , якщо тиск перегрітої пари становить  $p = 1,5 \text{ МПа}$ , її температура  $t = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура живильної води  $t_m = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , ККД КА 90 %. В якості палива використовується газ з нижчою теплотою згоряння  $Q_{Hu} = 35,8 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$ .

**Рішення:**

З рівня теплового балансу КА:  $BQ_{Hu}\eta_{КА} = D(i_{n..n.} - i_{ж..B.})$ ,

визначаємо, що  $B = \frac{D(i_{n..n.} - i_{ж..B.})}{Q_{Hu}\eta_{КА}} = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot (2920 - 419)}{35,8 \cdot 10^3 \cdot 0,9} = 310 \frac{\text{м}^3(\text{газ})}{\text{год}}$ .

Тут  $i_{n..n.} = 2920 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ , знаходиться з діаграми  $i$ - $s$  для водяної пари по заданим значенням її  $p$  і  $t$ .

$$i_{ж..B.} = C_{вт} t_{ж..B.} = 4,19 \cdot 100 = 419 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

де  $C_{вт} = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  – питома теплоємність води.

**Задача №3.** Для обігріву ремонтної майстерні в її приміщення потрібно подати 2 млн.  $\text{кДж}$  теплоти за годину. Визначити потрібну кількість водяної пари, необхідної для подачі в парову систему опалення майстерні, якщо тиск пари  $0,5 \text{ МПа}$ , її температура  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ . Конденсат, що виходить з системи опалення, має температуру  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Процес використання теплоти в системі проходить при  $p = \text{const}$ .

**Рішення:**

1. При  $p = \text{const}$ ,  $q = \Delta^3 = (i_n - i_k) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ,

де:  $i_n$  – ентальпія пари,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;

$i_k$  – ентальпія конденсату,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

З  $i$ - $S$  діаграми для водяної пари по заданим  $p = 0,5 \text{ МПа}$  і  $t = 180 \text{ }^\circ\text{C}$  знаходимо  $i_n = 2810 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

Ентальпія конденсату  $i_k = C_{вод} t_k = 4,19 \cdot 60 = 252 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

2. Кількість пари, що необхідно подати в систему опалювання:

$$m_n = \frac{Q}{q} = \frac{2 \cdot 10^6}{2810 - 252} = 780 \frac{\text{кг(пар)}}{\text{год}}.$$

Доповнення: якщо з  $i$ - $s$  діаграми знайти (по початковим параметрам пари) питомий об'єм пари  $v = 0,42 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ , то можна кількість пари, що подається в систему виразити в  $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ , як  $V = m v = 780 \cdot 0,42 = 327 \frac{\text{м}^3(\text{пар})}{\text{год}}$ .

**Задача №4.** Визначити зміну термічного ККД теоретичного циклу ПСУ, яка працює за циклом Ренкіна, якщо перевести її в роботу з сухої насиченої пари на перегріту до температури  $500^\circ\text{C}$ . В обох випадках початковий тиск пари (перед паровою турбіною)  $8 \text{ МПа}$ , а кінцевий (за турбіною)  $0,01 \text{ МПа}$ . Ентальпія киплячої води складає  $200 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

#### Рішення:

1. Термічний ККД циклу ПСУ:

а) при роботі на сухій насиченій парі:

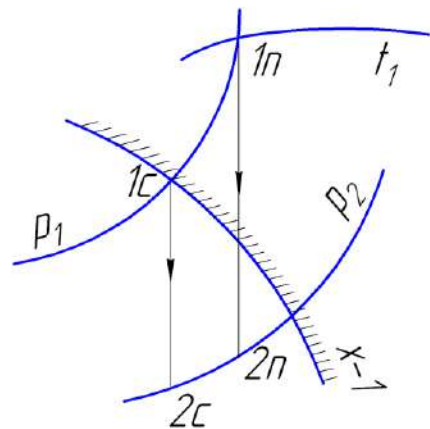
$$\eta_{tc} = \frac{i_{1c} - i_{2c}}{i_{1c} - i_3} = \frac{2760 - 1840}{2760 - 200} = 0,359.$$

б) при роботі на перегрітій парі:

$$\eta_{tn} = \frac{i_{1n} - i_{2n}}{i_{1n} - i_3} = \frac{3400 - 2140}{3400 - 200} = 0,394.$$

2. Зміна (підвищення) термічного ККД циклу:

$$\Delta\eta_t = \frac{\eta_{tn} - \eta_{tc}}{\eta_{tc}} = \frac{0,394 - 0,359}{0,359} \cdot 100\% = 9,75\%.$$



#### **Контрольні питання.**

1. Які термодинамічні процеси складають процес пароутворення в  $p$ - $v$  та  $T$ - $S$  діаграмах?
2. Як за допомогою  $i$ - $S$  діаграми визначити всі параметри водяної пари для заданого стану?
3. Зобразити в  $p$ - $v$  та  $T$ - $S$  діаграмах цикл Карно для водяної пари?
4. Зобразити цикл Ренкіна в  $p$ - $v$  та  $T$ - $S$  діаграмах. Його конструктивні переваги порівнюючи з циклом Карно.
5. Послідовність процесів, які складають цикл Карно.
6. Термічний ККД ПСУ та основні шляхи його підвищення.
7. Питомі витрати пари в ПСУ.
8. Зв'язок між роботою циклу  $\ell_o$  в  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг(пар)}}$  і  $\ell_o$  в  $\frac{\text{кВт}}{\text{кг(пар)}}$ .

#### Тема 9. Вологе повітря.

1. Поняття про вологе повітря і параметри, що характеризують його

стан.

2. Загальне уявлення про побудову ентальпійно – вологоміскістної (*i-d*) діаграми для вологого повітря.

3. Використання діаграми *i-d* при розрахунках процесів сушіння вологого матеріалу.

Під вологим повітрям розуміють механічну суміш сухого повітря і водяної пари в вологому повітрі.

До основних параметрів, що характеризують стан вологого повітря відноситься:

1. **вологоміскість повітря** - відношення маси водяної пари у вологому повітрі до маси сухого повітря:  $d = \frac{m_{в.п.}}{m_{с.п.}}, \frac{г(в.п.)}{кг(с.п.)}$ ;

2. **парціальний (частковий) тиск** водяної пари  $p_{в.п.}$ , чим більше водяної пари у вологому повітрі, тим більше її парціальний тиск;

3. **абсолютна вологість повітря** – відношення маси водяних парів до об'єму вологого повітря:  $\rho_{в.п.} = \frac{m_{в.п.}}{V_{в.п.}}, \frac{г(в.п.)}{м^3}$ ;

4. **відносна вологість повітря** – відношення фактичної абсолютної вологості до максимально можливої при даній температурі (температурі насичення):

$$\varphi = \frac{\rho_{в.п.}}{\rho_{в.п.мак}} 100\% ;$$

5. при охолодженні ненасиченого вологого повітря воно може стати насиченим. Температура, при якій вологе повітря внаслідок охолодження становиться насиченим називається **температурою точки роси**;

6. **температура вологого повітря** (сухого температура в психрометрі (прилад для вимірювання відносної вологості повітря)).

7. **ентальпія вологого повітря** – сума ентальпій 1кг сухого повітря і *d* кг водяної пари:  $i_{в.п.} = i_{с.п.} + d i_{в.п.} \frac{кДж}{кг}$  (без викладу  $i_{в.п.} = t + d(2500 + 2t), \frac{кДж}{кг}$ ).

Технічні розрахунки процесів з вологим повітрям виконуються більш за все за допомогою, так званої, *i-d* діаграми для вологого повітря, побудованої для тиску вологого повітря 745 мм рт. ст. В *i-d* діаграмі, для уникнення накладання кривих (ліній), кут між осями координат „*i*” і „*d*” обирається рівним 135°. По осі абсцис позначається вологоміскість повітря  $d, \frac{г(в.п.)}{кг(с.п.)}$ , а по осі ординат - всі інші параметри вологого повітря. Таким чином, на *i-d* діаграмі знаходяться лінії:

- ізотерми  $t_c = const$  (температури сухого термометра);
- ізотерми  $t_m = const$  (температури мокрого термометра в психрометрі);
- ізоентальпії  $i = const$ ;
- постійної відносної вологості повітря  $\varphi = const$ ;

- парціального тиску водяної пари  $p_{в.п.}$ .

Лінії  $d=const$  вертикалі, лінії  $t_c=const$  – прямі, які зліва-направо підіймаються угору;  $t_m=const$  – прямі, які зліва-направо спускаються вниз; лінії  $i=const$ , які спускаються зліва-направо – вниз; лінії  $\varphi=const$ , уявляють собою віяло кривих, які підіймаються зліва-направо – угору.

На діаграмі чітко виділяються дві характерні області: область ненасиченого вологого повітря (вище лінії  $\varphi=100\%$ ) і область перенасиченого вологого повітря (нижче лінії  $\varphi=100\%$ ). Очевидно, що для практичних задач інтерес представляє верхня область. Тому розміри нижньої області можна зменшити, якщо поставити вісь абсцис на „своє” місце в прямокутній системі координат.

**Задача 1.** Визначити параметри вологого повітря, якщо задані його:

а) температура  $t_c=15^\circ\text{C}$  і відносна вологість  $\varphi=70\%$ .

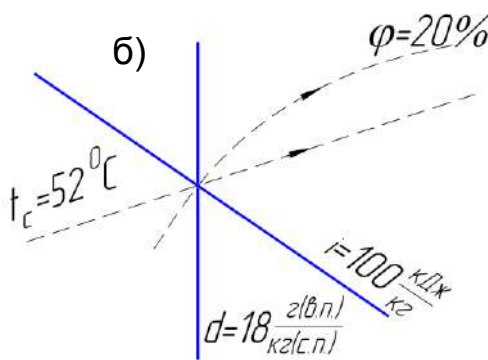
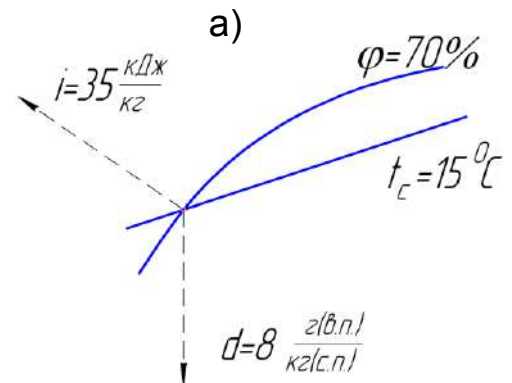
**Рішення:**

На  $i$ - $d$  діаграмі вологого повітря знаходимо точку перетину ліній

$t_c = 15^\circ\text{C}$  і  $\varphi=70\%$  і знаходимо:

вологомісткість повітря  $d = 8 \frac{\text{г(в.п.)}}{\text{кг(с.п.)}}$ ;

ентальпію повітря  $i = 35 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ; парціальний тиск  $p_{в.п.}=10 \text{ кПа}$ .



б) вологості повітря  $d=18 \frac{\text{г(в.п.)}}{\text{кг(с.п.)}}$  і

ентальпія  $i = 100 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

**Рішення:**

за допомогою

$i$ - $d$  діаграми

знаходимо точку перетину ліній  $d=18 \frac{\text{г(в.п.)}}{\text{кг(с.п.)}}$  і

$i=100 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ , а далі температуру  $t_c=52^\circ\text{C}$ ;

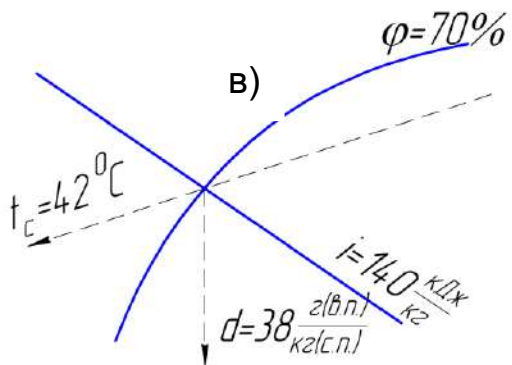
відносну вологість  $\varphi=20\%$  і парціальний тиск  $p_{в.п.}=23 \text{ кПа}$ .

в) ентальпія вологого повітря

$i=140 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  і його відносна вологість  $\varphi=70\%$ .

**Рішення:**

На  $i$ - $d$  діаграмі знаходимо точку перетину ліній  $i=140 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  і  $\varphi=70\%$ , а



далі вологомисткість повітря  $d=38 \frac{г(в.н)}{кг(с.н)}$ , температуру  $t_c=42\text{ }^{\circ}\text{C}$  і парціальний тиск  $p_{в.н.}=18\text{ кПа}$ .

**Задача 2.** В зерносушарку надходить повітря з параметрами  $t_c=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $\varphi=50\%$ . Потім воно підігрівається до температури  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  і подається в сушильну камеру. При виході із сушильної камери його температури дорівнює  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Визначити, користуючись  $i-d$  діаграмою зміну вологовмісткості повітря (до і після сушіння зерна).

### Рішення:

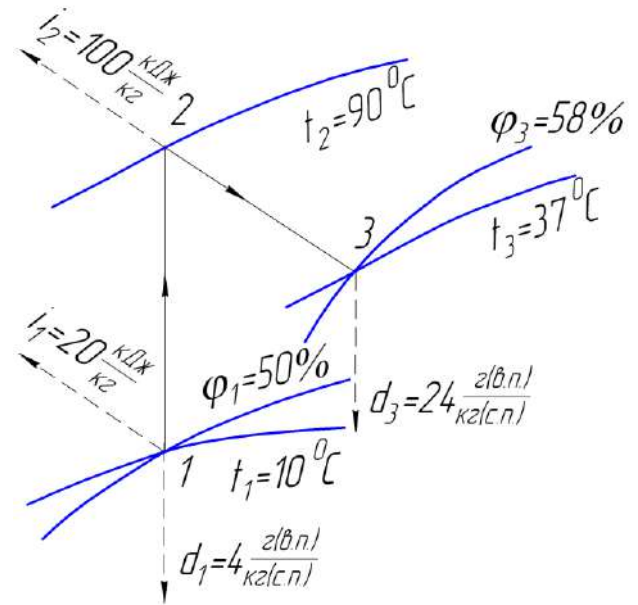
В перетині ліній  $t_c=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $\varphi=50\%$  знаходимо точку 1 і спускаючись вниз знаходимо вологомисткість повітря

$d_1=4 \frac{г(в.н)}{кг(с.н)}$ . Далі з точки 1 підіймаємося

вверх до перетину з лінією температури  $t_2=90\text{ }^{\circ}\text{C}$  (точка 2). Далі спускаємося в правохниз по лінії  $i=const$  (яка проходить через точку 2) до перетину з лінією  $t_3=37\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (точка 3) і спускаючись вниз знаходимо вологомисткість повітря на виході із сушильної камери  $d_3=25 \frac{г(в.н)}{кг(с.н)}$ .

Таким чином зміна вологовмісткості повітря буде становити:

$$\Delta d = d_3 - d_1 = 25 - 4 = 21 \frac{г(в.н)}{кг(с.н)}.$$



### **Контрольні питання.**

1. Що розуміють під вологовмісткістю, абсолютною та відносною вологістю повітря?
2. Якими приладами можна визначити відносну вологість повітря?
3. Як отримати стан вологого повітря, яке відповідає точці роси?
4. На які області поділяє  $i-d$  діаграму лінія повного насичення повітря водяними парами ( $\varphi=100\%$ )?
5. Як за допомогою  $i-d$  діаграми визначити всі параметри повітря заданого стану?
6. Як зображуються в  $i-d$  діаграмі процеси нагрівання (охолодження) повітря і сушіння вологого матеріалу?

### Тема 10. Холодильні установки.

1. Поняття про холодильну установку.
2. Вимоги до холодильників.
3. Основні типи холодильних установок.
4. Теоретичний цикл і основні характеристики холодильної установки.

**Холодильна установка** – це теплова машина, яка призначена для зниження температури охолоджувального середовища (продуктів) нижче температури навколишнього повітря і безперервного утримання цієї (зниженої) температури протягом довгого часу.

В холодильних установках реалізується перехід теплоти від менш нагрітих тіл до тіл більш нагрітих, що вимагає затрати ззовні роботи.

Установки, в яких енергія для одержання холоду витрачається на привід компресора, називаються **компресійними**. Установки, в яких енергія (в вигляді вже теплоти) витрачається на, так звану, термохімічну компресію, називаються **абсорбційними** (абсорбція – поглинання).

В якості холодоагентів (робочого тіла) в холодильних установках використовуються такі речовини, як аміак ( $NH_3$ ), який закипає при  $t = -33\text{ }^{\circ}C$ ; фреон-12 ( $CF_2Cl_2$ ), який закипає при  $t = -29,8\text{ }^{\circ}C$ ; фреон-22 ( $CHF_2Cl$ ), який закипає при  $t = -40,8\text{ }^{\circ}C$ .

#### Головні вимоги до холодоагентів:

1. Висока теплота пароутворення,  $\frac{\dot{q}_2}{\dot{m}}$ ;

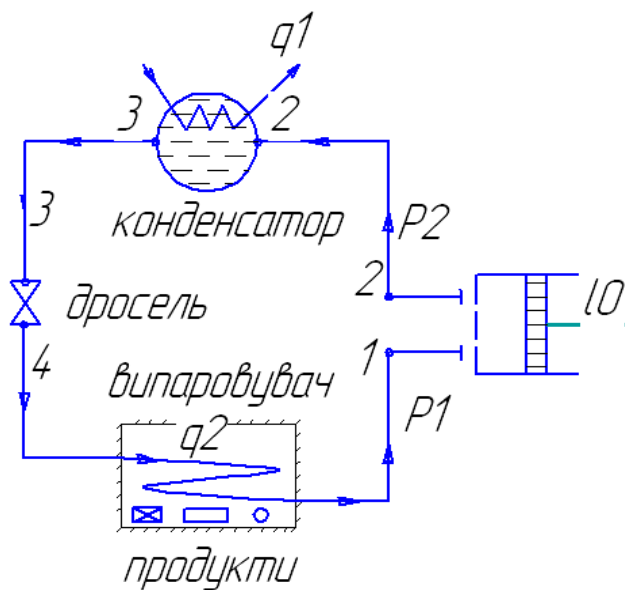


Рис. 16. Схема компресійної холодильної установки.

2. Тиск пари холодоагенту, відповідаючий потрібним низьким температурам, повинен бути трохи вищим, чим атмосферний тиск (легше виявити і боротися з можливими витокami агента).

Відсутність шкідливої дії холодоагенту на людей, а також на матеріали систем холодильника (відсутність їх корозії).

Схема, основні вузли і принцип дії компресійної холодильної установки наведені на рисунку 16.

Від охолоджувальних продуктів в випаровувачі (морозилці) теплота  $q_2$  підводиться до протікаючого по трубах холодоагенту. Останній починає бурхливо випаровуватись, відбираючи теплоту від продуктів. Утворена пара холодоагенту всмоктується компресором, стискується (їх температура і тиск помітно зростають) і спрямовується в конденсатор, де вона конденсується; віддаючи теплоту  $q_1$  в навколишнє середовище (повітря на кухні, задня стінка холодильника). Далі сконденсований холодоагент спрямовується до дроселя, в якому його тиск і температура помітно знижуються, і він (агент) стає більш „сприйнятливим” до теплоти, яка відбирається від охолоджувальних продуктів. На рис. 17 на

тепловій діаграмі ( $T$ - $S$  координат) зображений теоретичний цикл компресійної холодильної установки. Як видно, послідовність процесів, що складають теоретичний цикл такої холодильної установки, наступна: ізобара – ізотерма (4-1) → адіабата (1-2) → ізобара (2-3) → ізобара – ізотерма (3-4) → ізентальпія (3-4). Кількість теплоти  $q_2$ , відведеної 1 кг холодоагенту від охолоджувальних продуктів прийнято називати питомою холодопродуктивністю агента.

Досконалість теоретичного циклу холодильної установки оцінюється холодильним коефіцієнтом:

$$\varepsilon = \frac{q_2}{\ell_0} = \frac{q_2}{|q_1| - |q_2|}.$$

В зв'язку з тим, що процеси підведення та відведення теплоти від холодоагенту проходять при постійному (на своїй ділянці) тиску (коли  $q = \Delta i$ ),

$$\varepsilon = \frac{i_1 - i_4}{i_1 - i_2} \approx \frac{i_1 - i_3}{i_1 - i_2}.$$

Зазвичай  $\varepsilon = 2,5 \dots 4$ .

До основних характеристик холодильної установки відносяться:

1. **питома кількість теплоти**, що відводиться від продуктів (тіл, середовища) 1 кг холодоагенту:  $q_2 = i_1 - i_4$ ,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ,

де:  $i_1$  – ентальпія пари холодоагенту, яка поступає з випаровувача в компресор,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;

$i_4$  – ентальпія холодоагенту, поступаючого в випаровувач,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  (з таблиць термодинамічних властивостей холодоагенту).

2. **масова витрата холодоагенту**, який циркулює в холодильній машині

$$m_x = \frac{N_x}{q_2}, \frac{\text{кг}}{\text{с}},$$

де:  $N_x$  – холодильна потужність установки, кВт.

3. **теоретична питома робота компресора**, що витрачається на стискання 1

кг холодоагенту:  $\ell_{\text{кт}} = i_2 - i_1$ ,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ,

де:  $i_2$  – ентальпія пари холодоагенту на виході з компресора,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

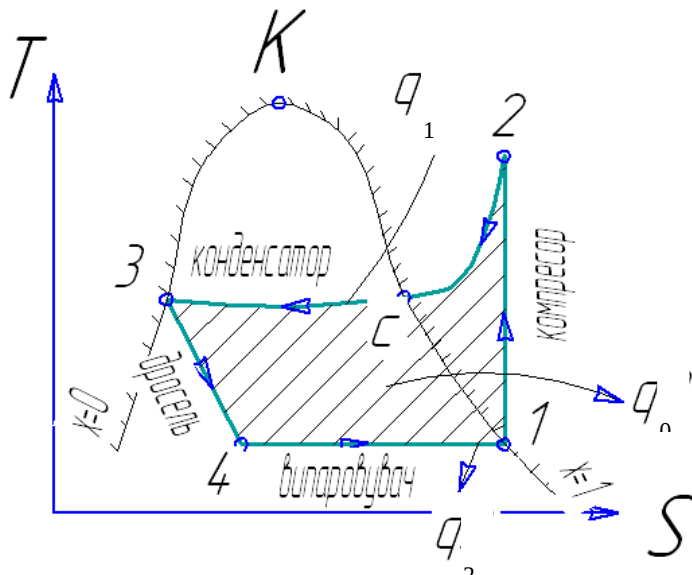


Рис. 17. Цикл компресійної холодильної установки.

4. **холодильний коефіцієнт установки:**  $\varepsilon = \frac{q_2}{\ell_k}$ .

Холодильний коефіцієнт суттєво залежить від температур в вузлових точках циклу і властивостей холодоагенту.

5. **ефективна потужність**, яка витрачається в компресорі на стискання пари холодоагенту:  $N_{K_\ell} = \frac{\ell_{Kt} m_x}{\eta_K}, \frac{\text{кДж}}{\text{с}}, \text{кВт}$ ,

де  $\eta_k$  - ККД компресора.

6. **ефективна питома холодильна потужність** холодильної установки:

$$n_{ex} = \frac{N_{хол}}{N_{ke}}, \frac{\text{кВт}}{\text{кВт}}.$$

**Задача №1.** Фреонова холодильна установка працює при температурі випаровування  $t_1 = -15^\circ \text{C}$  і температурі конденсації  $t_4 = 30^\circ \text{C}$ . Визначити питому кількість теплоти, що відводиться 1 кг фреона-12 від продуктів, а також холодильну потужність установки, якщо масова витрата агента складає  $0,3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ .

Пара з випаровувача виходє сухою насиченою. По таблиці термодинамічних властивостей фреона-12 на лінії насичення знаходимо по температурі  $t_1 = -15^\circ \text{C}$  ентальпію пари агента, яка з випаровувача поступає в компресор  $i_1 = 566,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ , а також ентальпію фреону (по температурі  $t_4 = 30^\circ \text{C}$ , що поступає в випаровувач  $i_4 = 447,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

**Рішення:**

1. Питома кількість теплоти, що відводиться 1 кг фреона-12 буде дорівнювати  $q_2 = i_1 - i_4 = 566,4 - 442,8 = 118,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;

2. Холодильна потужність установки  $N_x = m_x q_2 = 118,6 \cdot 0,3 = 35,5 \text{ кВт}$ .

**Задача №2.** Для холодильної установки, що працює при умовах попередньої задачі визначити масову витрату циркулюючого в установці фреона-12, холодильний коефіцієнт, ефективну потужність компресора, якщо холодильна потужність установки  $N_x = 75 \text{ кВт}$ , ентальпія пари фреону на виході з компресора  $i_2 = 610 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ , ефективний ККД компресора 0,8. Пара з випаровувача виходє сухою насиченою.

**Рішення:**

1. Питома кількість теплоти, що відведена 1 кг фреона-12:

$$q_2 = i_1 - i_4 = 566,4 - 442,8 = 118,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

2. Масова витрата циркулюючого в установці фреона-12:

$$m_x = \frac{N_x}{q_2} = \frac{75}{118,6} = 0,635 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

3. Теоретична питома робота компресора, що витрачається на стискання 1 кг пари фреона-12:  $\ell_k = i_2 - i_1 = 610 - 566,4 = 43,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$

4. Холодильний коефіцієнт:  $\varepsilon = \frac{q_2}{\ell_k} = \frac{118,6}{43,6} = 2,72.$

5. Ефективна потужність компресора в установці:

$$N_{ke} = \frac{m_x \ell_k}{\eta_k} = \frac{0,635 \cdot 43,6}{0,8} = 34,6 \text{ кВт}.$$

6. Ефективна питома холодильна потужність холодильної машини:

$$\eta_{ex} = \frac{N_{хол}}{N_{Ke}} = \frac{75}{34,6} = 2,16 \frac{\text{кВт}}{\text{кВт}}.$$

### Контрольні питання.

1. Що розуміють під холодильною установкою?
2. Які вимоги до холодильних агентів? Які з них знайшли найбільше застосування?
3. Як побудована і як працює компресійна холодильна установка?
4. Як виглядає в  $T$ - $S$  діаграмі та з яких термодинамічних процесів складається цикл компресійної холодильної установки?
5. Що називають холодильним коефіцієнтом холодильної установки?
6. Як побудована і як працює абсорбційна холодильна установка?

### Тема 11. Теплопровідність.

#### 1. Поняття про теплопровідність.

#### 2. Закон Фур'є – основний закон теплопровідності.

#### 3. Теплопровідність через плоску та циліндричну стінки.

**Теплопровідність** – це здібність матеріалу, або середовища проводити теплоту. Кількість теплоти, що передається в одиницю часу через ізотермічну поверхню в перпендикулярному до неї напрямку називається **тепловим потоком**  $Q$ , тепловий потік, віднесений до площі поверхні теплообміну називається **поверхневою щільністю** теплового потоку  $q_F = \frac{Q}{F}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$

Відповідно до закону Фур'є поверхнева щільність теплового потоку пропорційна градієнту температур  $q_F = -\lambda \cdot \text{grad } t, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$

де  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}};$

$\text{grad } t$  - параметр, що характеризує інтенсивність зміни температури в

даному напрямку,  $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{м}}$ .

Матеріали, для яких  $\lambda < 0,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}}$  називаються **теплоізоляційними** матеріалами.

Спираючись на закон Фур'є, можна вивести формулу для визначення теплового потоку через одношарову плоску стінку як:

$$Q = q_F F, \text{ Вт},$$

де  $q_F = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda}}$ , – поверхнева щільність теплового потоку,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ;

$F$  – площа поверхні теплообміну,  $\text{м}^2$ ;

$t_1 - t_2$  – перепад температур на стінці,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}}$ ;

$\delta$  – товщина стінки,  $\text{м}$ .

$$\text{Для багатошарової плоскої стінки: } q_F = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

де  $n$  – кількість шарів стінки;

$\delta_i$  – товщина  $i$ -того шару,  $\text{м}$ ;

$\lambda_i$  – коефіцієнт теплопровідності  $i$ -того шару стінки.

Для циліндричної стінки вводиться поняття лінійної щільності теплового потоку:  $q_\ell = \frac{Q}{\ell}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ ,

де  $\ell$  – довжина (труби), або висота циліндричної стінки,  $\text{м}$ .

Спираючись на закон Фур'є, можна вивести формулу для визначення лінійної щільності теплового потоку:  $q_\ell = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ ,

де  $d_1$  і  $d_2$  – внутрішній і зовнішній діаметри стінки,  $\text{м}$ ,  $\text{мм}$ .

$$\text{Для багатошарової циліндричної стінки: } q_\ell = \frac{\pi(t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}},$$

де  $n$  – кількість шарів стінки;

$\lambda_i$  і  $d_i$  – відповідно коефіцієнт теплопровідності і внутрішній діаметр  $i$ -того шару стінки.

**Задача №1.** Визначити в скільки разів зменшаться теплові втрати через вікна тваринницького приміщення, якщо в них одноряднозасклені рами замінити на дворяднозаскленими. Температура всередині приміщення  $+18^{\circ}\text{C}$ , ззовні  $-15^{\circ}\text{C}$ . Товщина скла в рамах  $3 \text{ мм}$ , коефіцієнт теплопровідності скла

$0,8 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ , товщина повітряного проміжку між рамами 50 мм, коефіцієнт теплопровідності повітря  $0,06 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ .

### Рішення.

1. Поверхнева щільність теплового потоку при одноряднозасклеваних рамах:

$$q_F = \frac{t_2 - t_1}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{18 - (-15)}{\frac{0,003}{0,8}} = 8800 \frac{Вт}{м^2}.$$

2. Поверхнева щільність теплового потоку при дворяднозасклеваних рамах:

$$q_F = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{18 - (-15)}{\frac{0,003}{0,8} + \frac{0,05}{0,06} + \frac{0,003}{0,8}} = 40 \frac{Вт}{м^2}$$

3. Як видно, при заміні рам тепловий потік зменшиться в

$$n = \frac{8800}{40} = 220 \text{ раз.}$$

**Задача №2.** Визначити зовнішню температуру плоскої цеглової стінки печі, якщо площа поверхні її теплообміну складає  $14 м^2$ , тепловий потік через стінку  $12 кВт$ , температура вогнетривкої кладки з боку топки печі  $1020 ^\circ C$ . Стінка складається з двох шарів: шару вогнетривкої цегли товщиною 250 мм і шару червоної цегли, товщина якої 250 мм. Коефіцієнт теплопровідності вогнетривкої глини  $0,34 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ , а червоної  $0,68 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ .

### Рішення:

1. Для плоскої багат шарової стінки маємо:  $q_F = \frac{Q}{F} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \frac{Вт}{м^2}$

Для нашого випадку  $q_F = \frac{t_1 - t_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}$ , звідки

$$t_3 = t_1 - q_F \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) = 1020 - \frac{12 \cdot 10^3}{14} \left( \frac{0,25}{0,34} + \frac{0,25}{0,68} \right) = 75 ^\circ C.$$

### **Контрольні питання.**

1. Що розуміють під теплопровідністю матеріалу (речовини)?
2. Що розуміють під температурним полем, ізотермічною поверхнею?
3. Що уявляє собою тепловий потік, поверхнева щільність теплового потоку?
4. Математичний вираз і фізичний зміст закону Фур'є.
5. Що розуміють під коефіцієнтом теплопровідності матеріалу, його розмірність?

6. Який матеріал вважають теплоізоляційним?
7. Напишіть вираз для визначення теплового потоку крізь плоску і циліндричну стінки.

## Тема 12. Конвективний теплообмін.

1. Поняття про конвективний теплообмін.
2. Закон Ньютона – Ріхмана – основний закон конвективного теплообміну.
3. Критеріальні рівняння і приклади їх використання при вирішенні задач.

**Конвективним теплообміном** (тепловіддачею) називається теплообмін між будь-якою твердою поверхнею (стінкою) і обмиваючою її рідиною або газом (див. рис. 18).

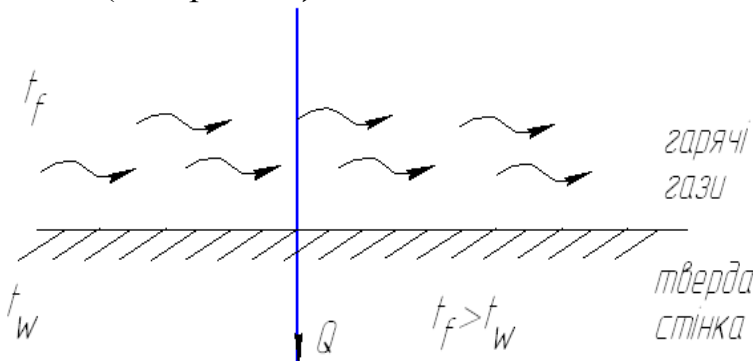


Рис.18. Конвективний теплообмін.

Відповідно до закону Ньютона – Ріхмана тепловий потік (від газу до стінки) дорівнює

$$Q = \alpha(t_f - t_w)F, \text{ Вт},$$

де  $t_f$  і  $t_w$  - температури відповідно гарячого газу і стінки;

$F$  – теплоприймаюча поверхня, м<sup>2</sup>;

$\alpha$  – **коефіцієнт тепловіддачі** – параметр, що характеризує інтенсивність тепловіддачі,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$  – кількість теплоти, що приймається за одиницю часу (сек.) 1 м<sup>2</sup> твердої поверхні при різниці температур рідини і поверхні в 1 °С.  $\alpha = \varphi$  (геометричних характеристик стінки, фізичних характеристик стінки і рідини (газу), форми стінки, режиму обтікання, орієнтації стінки до напрямку руху обмиваючої рідини і т.д.)

Визначити величину  $\alpha$  досить нелегко, але можна, спираючись на теорію подібності фізичних явищ, яка оперує, так званими, критеріями подібності і критеріальними рівняннями.

**Критерій подібності** – це безрозмірний комплекс, складений із параметрів, що характеризують дане фізичне явище. **Критеріальне рівняння** – це функціональний зв'язок між різними критеріями подібності, які відтіняють (характеризують) особливості даного явища (тепловіддачі).

В теорії конвективного теплообміну, найбільш часто використовуються наступні критерії подібності:

1. **Критерій Нуссельта:** 
$$Nu = \frac{\alpha \ell_0}{\lambda_f},$$

де:  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$ ;

$\ell_0$  – характерний лінійний розмір, м;

$\lambda_f$  – коефіцієнт теплопровідності рідини (газу), яка омиває стінку.

Критерій Нуссельта завжди визначає критерій, бо в його склад входить коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ .

**2. Критерій Грасгофа:** 
$$Gr = \frac{g \ell_0^3 \beta \Delta t}{\nu_f^2};$$

де:  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\frac{м}{с^2}$ .

$\ell_0$  – характерний лінійний розмір, м.

$\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення рідини,  $\frac{1}{^\circ C}$ ;

$\Delta t$  – температурний перепад між стінкою і обмиваючою її рідиною (газом);

$\nu_f$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, що обмиває стінку,  $\frac{м^2}{с}$ .

**3. Критерій Рейнольдса:** 
$$Re = \frac{W \ell_0}{\nu_f},$$

де:  $W$  – швидкість рідини, що обмиває стінку,  $\frac{м}{с}$ .

**4. Критерій Прандтля:** 
$$Pr = \frac{\nu_f}{a},$$

де  $a = \frac{\lambda}{\rho c}$  – коефіцієнт температуропровідності стінки;

$c$  – питома масова теплоємність матеріалу стінки,  $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ ,

$\rho$  – масова густина матеріалу,  $\frac{кг}{м^3}$ .

В загальному вигляді функціональний зв'язок між цими критеріями подібності визначається як:  $Nu = \varphi(Re, Gr, Pr...)$  або по рекомендації академіка

Міхєєва  $Nu = c Re^n Gr^m Pr^p ...$ ,

де  $c, n, m, p$  – величини, числове значення яких знаходиться експериментально, наприклад, для конвективного теплообміну при змушеному русі в трубах і турбулентному режимі руху:

$$Nu_f = 0,021 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25},$$

тут індекси „ $f$ ” „ $W$ ” вказують на те, по яким параметрам (рідини чи стінки) складався критерій.

Конвективний теплообмін при вільному русі рідини в необмеженому

просторі може бути описаний як:  $Nu_f = 0,54 (Gr_f \cdot Pr_f)^{0,25}$ .

При обмиванні гарячим повітрям плоскої пластини і турбулентному режимі обтікання:

$$Nu_f = 0,037 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}.$$

**Задача 1.** Для опалення складського приміщення гаража використовується труба, по якій протікає гаряча вода. Визначити тепловий потік від поверхні труби до повітря приміщення, якщо діаметр труби 100 мм, її довжина 10 м, температура поверхні труби 80 °С, температура повітря в приміщенні 20 °С.

Необхідні довідникові дані:

- коефіцієнт теплопровідності повітря:  $\lambda_f = 2,84 \cdot 10^{-2} \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ ;
- коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря:  $\nu_f = 18,2 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$ ;
- коефіцієнт об'ємного розширення повітря:  $\beta = 3,1 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ C}$ ;
- критерій Прандтля:  $Pr_f = 0,72$ .

#### **Рішення:**

1. Відповідно до закону Ньютона-Ріхмана тепловий потік при конвективному теплообміні:  $Q = \alpha(t_f - t_w)F$ , Вт.

В цьому рівнянні невідома величина  $\alpha$ - коефіцієнт тепловіддачі від поверхні труби до повітря приміщення. Для його визначення скористуємося критеріальним рівнянням:  $Nu_f = 0,54 (Gr_f Pr_f)^{0,25}$  і знайдемо значення критерія Нуссельта, до якого входить коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ .

2. Для цього визначимо критерій Грасгофа:

$$Gr = \frac{g \ell_o^3 \beta \Delta t}{\nu_f^2} = \frac{9,81 \cdot 0,1^3 \cdot 3,1 \cdot 10^{-3} (80 - 20)}{(18,2 \cdot 10^{-6})^2} = 6 \cdot 10^6;$$

3. А далі  $Nu_f = 0,54 (Gr_f Pr_f)^{0,25} = 0,54 (6 \cdot 10^6 \cdot 0,72)^{0,25} = 24,5$ .

4. Пам'ятаючи, що  $Nu = \frac{\alpha \ell_o}{\lambda_f}$ , знайдемо коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  як:

$$\alpha = \frac{Nu_f \lambda_f}{\ell_o} = \frac{24,5 \cdot 2,84 \cdot 10^{-2}}{0,1} = 7,0 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}.$$

5. І тоді тепловий потік від поверхні труби до повітря приміщення буде становити:  $Q = \alpha(t_f - t_w)F = 7 \cdot (80 - 20) \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot 10 = 1320 \text{ Вт} = 1,32 \text{ кВт}$ .

**Задача 2.** Гладка плита довжиною 1,8 м і шириною 1,0 м обдувається вздовж сухим повітрям зі швидкістю 6 м/сек. Визначити тепловий потік від поверхні плити до повітря, якщо температура плити 80 °С, а температура повітря 20 °С. В розрахунках прийняти:

- коефіцієнт теплопровідності повітря:  $\lambda_f = 2,84 \cdot 10^{-2} \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ ;
- коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря:  $\nu_f = 18,2 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$ .

В якості критеріального рівняння прийняти (для турбулентного режиму руху повітря)  $Nu_f = 0,032 Re_f^{0,8}$ .

### **Рішення:**

1. Визначаємо критерій Рейнольдса і оцінюємо режим руху повітря:

$$Re = \frac{W \ell_0}{\nu_f} = \frac{6 \cdot 1,8}{18,2 \cdot 10^{-6}} = 6 \cdot 10^5 \quad \text{це більше } 10^4, \quad \text{тому режим руху}$$

турбулентний.

2. Критерій Нуссельта:  $Nu_f = 0,032 Re_f^{0,8} = 0,032 (6 \cdot 10^5)^{0,8} = 1340$ .

3. Коефіцієнт тепловіддачі:  $\alpha = \frac{Nu_f \lambda_f}{\ell_0} = \frac{1340 \cdot 2,84 \cdot 10^{-2}}{1,8} = 21,1 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$

4. Тепловий потік від поверхні плити до потоку повітря:

$$Q = \alpha (t_f - t_w) F = 21,1 \cdot (80 - 20) \cdot 1,8 \cdot 1 = 2280 \text{ Вт} = 2,28 \text{ кВт}.$$

### **Контрольні питання.**

1. Що розуміють під конвективним теплообміном? Які розрізняють види конвекції?
2. Які розрізняють види руху рідини (газа) відносно твердої стінки?
3. Математичний вираз і фізичний зміст закону Ньютона-Ріхмана.
4. Що розуміють під коефіцієнтом тепловіддачі, його розмірність та які фактори впливають на його величину?
5. Що розуміють під критеріями подібності фізичних явищ? Які критерії використовуються в теорії конвективного теплообміну?
6. Що уявляє собою критеріальне рівняння? Як воно підбирається і використовується?

### **Тема 13. Променевий теплообмін.**

**1. Поняття про променевий теплообмін.**

**2. Закон Стефана - Больцмана – основний закон променевого теплообміну.**

**3. Визначення променевих теплових потоків між тілами.**

**4. Поняття про екранування.**

**Теплове випромінювання** – це процес розповсюдження (поширення) в просторі внутрішньої енергії випромінюючого тіла в вигляді електромагнітних хвиль. Для їх розповсюдження не треба матеріального середовища. У вакуумі вони розповсюджуються зі швидкістю світла (300000 км/с). Енергія випромінювання випромінюється не безперервно, а у вигляді порцій – квантів. Їх носіями являються елементарні частки – фотони. Енергія, що випромінюється тілом в одиницю часу – секунду, називається **поток**

**випромінювання**, Дж/с, Вт. Потік випромінювання, що приходить на  $1 \text{ м}^2$  випромінюючої поверхні, називається **щільністю потоку випромінювання**  $E$ , Вт/м<sup>2</sup>. Випромінюють всі тіла, абсолютна температура яких відрізняється від 0, К. Тіло, яке повністю поглинає падаючий на нього променевий потік, називається **абсолютно чорним тілом**.

Якщо випромінювання проходить в діапазоні довжини хвиль від 0 до  $\infty$  м, то таке випромінювання називається **інтегральним** (тверді тіла і рідини). Якщо ж випромінювання іде в діапазоні конкретних довжин хвиль (полос), то таке випромінювання називається **селективним** (вибірковим). Випромінювання, яке властиве конкретній хвилі, називається **монохроматичним**.

Щільність потоку монохроматичного випромінювання називається **спектральною інтенсивністю** випромінювання тіла.

Сума власного потоку випромінювання тіла і відбитого цим тілом падаючого на нього потоку випромінювання інших тіл називається **ефективним потоком випромінювання** даного тіла.

**Випромінювання** – променевий теплообмін – дуже складний фізичний процес, який підпорядковується декільком законам (Планка, Віна, Стефана - Больцмана, Кірхгофа, Ламберта). Основним з них (хоча всі вони важливі, бо описують різні сторони процесу випромінювання) є закон Стефана – Больцмана, який стверджує, що щільність потоку випромінювання абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому ступеню його абсолютної температури.

$$E_o = c_o \left( \frac{T}{100} \right)^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

де  $c_o$  – стала Стефана - Больцмана (коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла,  $c_o = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ ).

Для реальних (сірих) тіл інтенсивність випромінювання на кожній довжині хвилі при будь-якій температурі складає тільки частину випромінювання абсолютно чорного тіла. Це враховується, так званим, **ступенем чорноти тіла**

$$\varepsilon = \frac{E}{E_o}. \text{ Тоді для реальних тіл } E = \varepsilon \tilde{c}_o \left( \frac{T}{100} \right)^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Променевий теплообмін між двома тілами, які мають абсолютну температуру відповідно  $T_1$  і  $T_2$ , ступені чорноти  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$ , площі поверхонь випромінювання  $F_1$  і  $F_2$  можна визначити по формулі (при  $T_1 > T_2$ ):

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{36} c_o \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{1(\text{розр})} \varphi_{1-2}, \text{ Вт},$$

$$\text{де } \varepsilon_{36} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} - \text{зведений ступінь чорноти системи тіл 1-2},$$

$\varphi_{1-2}$  – коефіцієнт взаємного опромінювання системи тіл, знаходиться в залежності від взаємного розташування тіл (для пластин, розташованих паралельно одна одній,  $\varphi_{1-2} = 1$ , для тіл, які знаходяться одне в одному,  $\varphi_{1-2} < 1$  і знаходиться по таблицям).

Для послаблення (зменшення) променевих теплових потоків між тілами встановлюють спеціальні екрани з високою відбивною здатністю (малими ступенями чорноти). Це дозволяє в декілька разів (інколи в десятки) зменшити променеві теплові потоки. Для плоских паралельно розташованих тіл (і між ними екрану) можна записати, що

$$q_{1-e-2} = \left( \frac{\varepsilon_{3\theta_{1-e}} \varepsilon_{3\theta_{e-2}}}{\varepsilon_{3\theta_{1-e}} + \varepsilon_{3\theta_{e-2}}} \right) q_{1-2}, \frac{Вт}{м^2},$$

де  $\varepsilon_{3\theta_{1-e}}$  - зведений ступінь чорноти системи: перше тіло - екран,

$\varepsilon_{3\theta_{e-2}}$  - зведений ступінь чорноти системи: екран - друге тіло,

$\varepsilon_{3\theta_{1-2}}$  - зведений ступінь чорноти системи: перше тіло-друге тіло (без екрану),

$q_{1-2}$  - щільність променевого теплового потоку між тілами 1-2 (без екрану).

**Задача 1.** Визначити теплообмін випромінюванням між стінками посудини Дьюара, всередині якого зберігається рідкий кисень, якщо на внутрішній поверхні зовнішньої стінки температура  $27^\circ\text{C}$ , а на зовнішній поверхні внутрішньої стінки посудини температура  $-183^\circ\text{C}$ . Стінки посудини покриті шаром срібла, ступінь чорноти якого  $0,02$ . Площі поверхонь стінок: внутрішньої  $0,22 \text{ м}^2$ , зовнішньої -  $0,23 \text{ м}^2$ . Коефіцієнт взаємного опромінювання  $= 0,6$ .

#### Рішення:

1. Променевий тепловий потік між стінками посудини:

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{3\theta} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{1(\text{розр})} \varphi_{1-2} = 0,01 \cdot 5,67 \left[ \left( \frac{300}{100} \right)^4 - \left( \frac{90}{100} \right)^4 \right] 0,22 \cdot 0,6 = 0,6 \text{ Вт}$$

$$\text{Тут } \varepsilon_{3\theta} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} = \frac{1}{\frac{1}{0,02} + \frac{0,22}{0,23} \left( \frac{1}{0,02} - 1 \right)} \approx 0,01.$$

**Задача 2.** Ізольована теплофікаційна труба довжиною  $20 \text{ м}$  з зовнішнім діаметром ізоляції  $250 \text{ мм}$  розташована усередині бетонного каналу з поперечним перерізом  $500 \times 700 \text{ мм}$ . Температура поверхні ізоляції труби і внутрішніх стінок каналу дорівнюють відповідно  $45^\circ\text{C}$  і  $15^\circ\text{C}$ . Ступені їх чорноти: каналу  $0,91$ , а ізоляції  $0,75$ . Коефіцієнт взаємного опромінювання  $0,92$ . Визначити втрату теплоти випромінюванням з поверхні труби за  $1$  годину.

#### Рішення:

1. Характерні поверхні:

а) труби  $F_1 = \pi d \ell = 3,14 \cdot 0,25 \cdot 20 = 15,75 \text{ м}^2$ ;

б) каналу  $F_2 = 2(a + b)\ell = 2(0,5 + 0,7)20 = 48 \text{ м}^2$ .

2. Тепловий променевий потік з поверхні труби до поверхні внутрішньої стінки каналу:

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{3\theta} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_{1\varphi_{1-2}} = 0,825 \cdot 5,67 \left[ \left( \frac{318}{100} \right)^4 - \left( \frac{288}{100} \right)^4 \right] 15,75 \cdot 0,92 = 2220 \text{ Вт}$$

де  $\varepsilon_{36}$  - зведений ступінь чорноти системи «труба - стінки каналу»

$$\varepsilon_{36} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} = \frac{1}{\frac{1}{0,91} + \frac{15,75}{48} \left( \frac{1}{0,75} - 1 \right)} = 0,825.$$

3. Витрати теплоти випромінюванням:

$$Q_\tau = Q_{1-2} \tau = 2220 \cdot 3600 = 8720000 \frac{\text{Дж}}{\text{год.}} = 8,7 \frac{\text{МДж}}{\text{год.}}$$

### Контрольні питання.

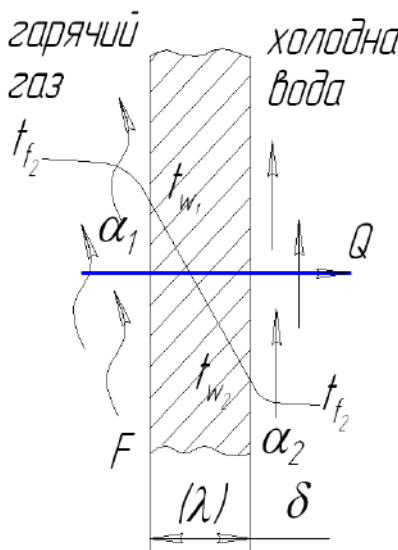
1. Що розуміють під променевим теплообміном?
2. Математичний вираз і фізичний зміст закону Стефана-Больцмана.
3. Що розуміють під ступенем чорноти тіла?
4. В чому суть встановлення екрану між тілами, які обмінюються тепловипромінюванням? Матеріали, які застосовують для екранування.

### Тема 14: Складний теплообмін. Теплопередача.

1. Поняття про теплопередачу.
2. Теплопередача через плоску одношарову і багатошарову стінки.
3. Теплопередача через циліндричну одношарову і багатошарову стінки.
4. Способи посилення і послаблення теплових потоків при теплопередачі.

**Теплопередача** – це процес передачі теплоти від одного теплоносія до іншого через тверду стінку, яка їх розділяє. Перший теплоносіє часто називають «гарячим» (він нагріває); інший – «холодним» (він нагрівається) (див. рис. 19).

Поверхнева щільність теплового потоку при теплопередачі через одношарову плоску стінку визначається по формулі:



$$q_F = \frac{Q}{F} = k_F (t_{f1} - t_{f2}), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

де  $Q$  – тепловий потік,  $\text{Вт}$ ;

$F$  – площа поверхні теплообміну,  $\text{м}^2$ ;

$t_{f1}, t_{f2}$  – температури «гарячого» і

«холодного» теплоносіїв,  $^\circ\text{C}$ ;

$k_F$  (поверхневий) коефіцієнт теплопередачі – параметр, що характеризує інтенсивність теплопередачі: кількість теплоти, яка передається за одиницю часу (сек.) від одного теплоносія до

іншого через  $1 \text{ м}^2$  поверхні стінки, яка розділяє теплоносії, при перепаді температур між

Рис.19. Теплопередача через одношарову плоску стінку.

теплоносіями в  $1^{\circ}\text{C}$ :

$$k_F = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \frac{Bm}{m^2 \cdot ^{\circ}C},$$

де:  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі від гарячих газів до стінки,  $\frac{Bm}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$ ;

$\delta$  – товщина стінки,  $m$ .

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки,  $\frac{Bm}{m \cdot ^{\circ}C}$ ;

$\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до холодної води,  $\frac{Bm}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$ ;

Температури поверхонь стінки визначаються як:

а) з внутрішньої сторони  $t_{w_1} = t_{f_1} - \frac{q_F}{\alpha_1}, ^{\circ}C$ ;

б) з зовнішньої сторони  $t_{w_2} = t_{f_2} + \frac{q_F}{\alpha_2}, ^{\circ}C$ .

При багатошаровій плоскій стінці поверхнева щільність теплового потоку визначається як:  $q_F = k_F (t_{f_1} - t_{f_2}), \frac{Bm}{m^2}$ ,

де  $k_F = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \frac{Bm}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$ , тут  $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$  – сума термічних опорів шарів стінки,

$n$  – кількість шарів.

Сам тепловий потік визначається як:  $Q = q_F F, Bm$ .

Кількість переданої теплоти через стінку за визначений період часу:

$Q_{\tau} = Q\tau, ДЖ$ , де  $\tau$  – час в секундах.

Лінійна щільність теплового потоку через одношарову циліндричну стінку (див. рис. 20) визначається за формулою:

$$q_{\ell} = k_{\ell} \pi (t_{f_1} - t_{f_2}), \frac{Bm}{m},$$

де  $k_{\ell} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}, \frac{Bm}{m \cdot ^{\circ}C}$  –

лінійний коефіцієнт теплопередачі – параметр, який характеризує інтенсивність теплопередачі через 1 погонний метр стінки при перепаді

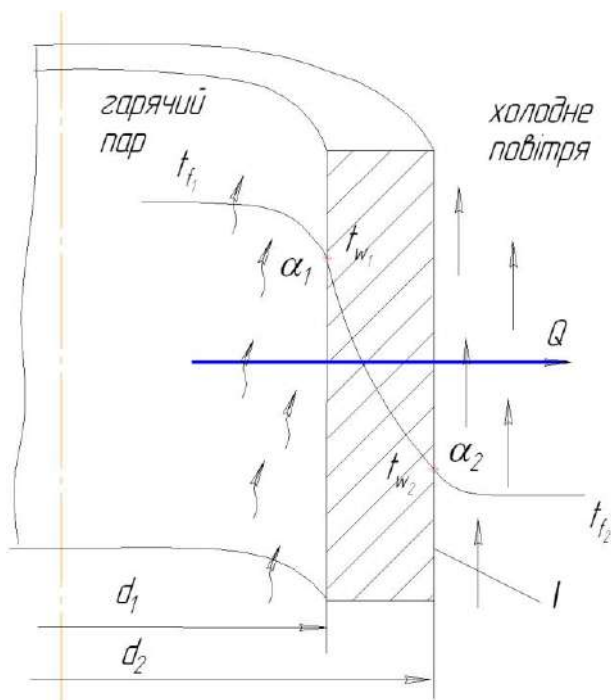


Рис.20. Теплопередача через одношарову циліндричну стінку.

температур між теплоносіями в 1 °C.

$d_1$  і  $d_2$  – відповідно внутрішній і зовнішній діаметри стінки, м.

Температури поверхонь стінки визначаються як:

а) з внутрішньої сторони  $t_{w_1} = t_{f_1} - \frac{q_\ell}{\pi \alpha_1 d_1}$ , °C ;

б) з зовнішньої сторони  $t_{w_2} = t_{f_2} + \frac{q_\ell}{\pi \alpha_2 d_2}$ , °C .

Тепловий потік через циліндричну стінку визначається як:

$$Q = q_\ell \ell, \text{ Вт},$$

де  $\ell$  - довжина (труби), або висота стінки, м.

Кількість переданої теплоти через стінку за визначений період часу:

$$Q_\tau = Q\tau, \text{ Дж},$$

де  $\tau$  – час в секундах.

Для багатошарової циліндричної стінки  $q_\ell = k_\ell \pi (t_{f_1} - t_{f_2})$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ ,

де  $k_\ell = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$ ,  $n$  – кількість шарів стінки.

Для інтенсифікації (посилення) теплового потоку при теплопередачі часто застосовують оребрення стінки зі сторони низького коефіцієнту тепловіддачі (зовнішня сторона стінки).

Відношення площі оребреної поверхні стінки ( $F_2$ ) до площі неоребреної поверхні ( $F_1$ ) називають **коефіцієнтом оребрення** стінки:  $\phi_{op} = \frac{F_2}{F_1}$ ,  $\phi_{op} = 2 \dots 6$ .

Тоді поверхнева щільність теплового потоку через плоску поверхню  $F_1$  оребреної стінки визначається як:  $q_{F_1} = \frac{t_{f_1} - t_{f_2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2 \phi_{op}}}$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ , або через оребрену

поверхню  $F_2$ :  $q_{F_2} = \frac{t_{f_1} - t_{f_2}}{\frac{1}{\alpha_1 \phi_{op}} + \frac{\delta}{\lambda \phi_{op}} + \frac{1}{\alpha_2}}$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Тепловий потік через оребрену стінку:  $Q = q_{F_1} F_1 = q_{F_2} F_2$ , Вт .

Для оребреної циліндричної стінки лінійна щільність теплового потоку визначається як:  $q_{\ell_1} = \frac{\pi (t_{f_1} - t_{f_2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2 \phi_{op}}}$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}}$

Для послаблення теплових потоків при теплопередачі часто застосовують теплоізоляційні матеріали, для яких коефіцієнт теплопровідності  $\lambda < 0,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

Для плоскої стінки нанесення теплоізоляційного шару автоматично послаблює тепловий потік, який визначається, як для багатошарової плоскої стінки.

Для циліндричної стінки нанесення шару ізоляції може і послабити, і посилити тепловий потік. Якщо зовнішній діаметр стінки  $d_2$  менше критичного діаметра ізоляції  $d_{2из.кр.} = \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_2}$ , м, то на стінку краще не наносити шар ізоляції.

Якщо ж діаметр  $d_2 > d_{2из.кр.}$ , то на стінку (для послаблення теплового потоку) потрібно нанести шар ізоляції.

**Задача 1.** Плоска сталева стінка ( $\lambda = 45 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ ) товщиною 5 мм омивається з одного боку гарячими газами з температурою  $1500^\circ C$ , а з другої охолоджується водою з температурою  $27^\circ C$ . Коефіцієнти тепловіддачі від газів до стінки і від стінки до води дорівнюють відповідно  $500 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$  і  $3500 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$ . Визначити поверхневу щільність теплового потоку і перепад температур на стінці.

**Рішення:**

1) Поверхнева щільність теплового потоку:

$$q_F = k_F (t_{f1} - t_{f2}) = 420 (1500 - 27) = 620000 \frac{Вт}{м^2} = 620 \frac{кВт}{м^2},$$

де  $k_F$  – поверхневий коефіцієнт теплопередачі:

$$k_F = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{500} + \frac{0,005}{45} + \frac{1}{3500}} = 420 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}.$$

2) Температура стінки з боку газів:

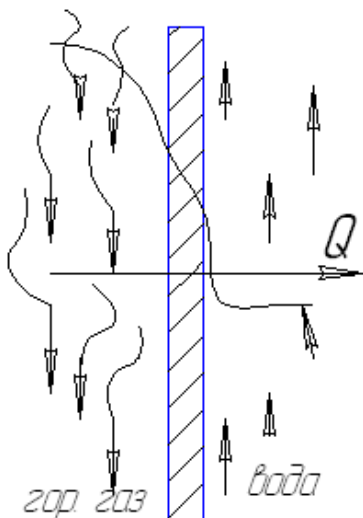
$$t_{w1} = t_{f1} - \frac{q_F}{\alpha_1} = 1500 - \frac{620 \cdot 10^3}{500} = 260^\circ C.$$

3) Температура стінки з боку води:

$$t_{w2} = t_{f2} + \frac{q_F}{\alpha_2} = 27 + \frac{620 \cdot 10^3}{3500} = 204^\circ C.$$

4) Перепад температур на стінці:

$$\Delta t_w = t_{w1} - t_{w2} = 260 - 204 = 56^\circ C.$$



**Задача 2.** Сталевий паропровід ( $\lambda = 50 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ ) діаметром 200/216 мм покритий шаром ізоляції товщиною 120 мм ( $\lambda_{из} = 0,11 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$ ). Температура пари всередині паропроводу  $300^\circ C$ , а навколишнього повітря  $25^\circ C$ . Визначити температуру поверхні ізоляції, якщо коефіцієнти тепловіддачі від пари до внутрішньої стінки

паропроводу  $115 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$ , а від поверхні ізоляції до навколишнього повітря  $10 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$ .

### **Рішення:**

1. Лінійний коефіцієнт теплопередачі через стінки паропроводу:

$$k_\ell = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} = \frac{1}{\frac{1}{115 \cdot 0,2} + \frac{1}{2 \cdot 50} \ln \frac{0,216}{0,2} + \frac{1}{10 \cdot 0,456}} = 0,272 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$$

2. Лінійна щільність теплового потоку через стінки паропроводу:

$$q_\ell = k_\ell \pi (t_{f1} - t_{f2}) = 0,272 \cdot 3,14 (300 - 25) = 235 \frac{Вт}{м}$$

3. Температура поверхні ізоляції:

$$t_{3из} = t_{f2} + \frac{q_\ell}{\pi \alpha_2 d_{3из}} = 25 + \frac{235}{3,14 \cdot 10 \cdot 0,456} = 42 ^\circ C.$$

### **Контрольні питання.**

1. Що розуміють під теплопередачею?
2. Що розуміють під коефіцієнтом теплопередачі крізь одношарову плоску стінку, його розмірність?
3. Що розуміють під лінійним коефіцієнтом теплопередачі крізь одношарову циліндричну стінку?
4. Які існують способи інтенсифікації теплопередачі?
5. Що називають коефіцієнт оребрення стінки?
6. Призначення і основні властивості теплоізоляційних матеріалів.
7. Що розуміють під критичним діаметром ізоляції?

## **Тема 15. Теплообмінні апарати.**

**1. Поняття про рекуперативний теплообмінний апарат.**

**2. Основні рівняння для розрахунку теплообмінного апарату.**

**Теплообмінний апарат (ТА)**— це технічний пристрій, призначений для передачі теплоти від одного теплоносія до іншого (від нагріваючої рідини до тієї, що нагрівається, від охолоджуваної рідини до тієї, що охолоджує).

В якості теплоносіїв в ТА, звичайно, використовують гарячу воду, холодну воду, гарячі гази, водяний пар, повітря, масла, сольові розчини та інше. В залежності від способу передачі теплоти ТА поділяють на 2 групи:

- 1) контактні (змішувальні);
- 2) поверхневі (регенеративні та рекуперативні).

У контактних ТА теплообмін відбувається за рахунок безпосереднього стикання (і змішення) гарячого і холодного теплоносіїв (струменеві ТА, елеватори, градирні).

У регенеративних ТА теплота гарячого теплоносія спочатку акумулюється в спеціальних камерах-насадках, а потім поглинається

(забирається) холодним теплоносієм, який проходить через камеру. (Це апарати періодичної дії).

У найбільш поширених рекуперативних ТА теплообмін між теплоносіями відбувається через постійно їх розділяючу тверду стінку.

В залежно від напрямку руху теплоносіїв розрізняють 3 схеми ТА:

1. прямотечія  $\Rightarrow$ ;
2. протитечія  $\Leftarrow$ ;
3. перехресна течія 

Тепловий розрахунок ТА базується на двох рівняннях:

1. рівнянні теплового балансу в ТА:

$$Q_1 = Q_2 = Q = m_1 c_1 (t_1' - t_2'') = m_2 c_2 (t_2'' - t_2'), \text{ Вт}.$$

де  $m$  – масова витрата теплоносія,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;

$C$  – питома теплоємність носія,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ ;

$t$  – температура теплоносіїв,  $^\circ\text{C}$ .

Індекси: 1 – перший теплоносіє, 2 – другий теплоносіє, ' – вхід в ТА, '' – вихід з ТА.

В деяких випадках в цьому рівнянні добуток  $mc = w$  називають **умовним тепловим еквівалентом** теплоносія.

2. рівнянні теплопередачі в ТА:  $Q = kF\Delta t_{cp}, \text{ Вт},$

де  $k$  – коефіцієнт теплопередачі в ТА,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ ,

$F$  – площа поверхні теплообміну в ТА;

$\Delta t_{cp}$  – середній логарифмічний температурний перепад між теплоносіями в ТА,  $^\circ\text{C}$ .

$$\text{Для схеми «прямотечія»}: \Delta t_{cp\Rightarrow} = \frac{(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'')}{\ln \frac{t_1' - t_2'}{t_1'' - t_2''}}, ^\circ\text{C}.$$

$$\text{Для схеми «протитечія»}: \Delta t_{cp\Leftarrow} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{t_1' - t_2''}{t_1'' - t_2'}}, ^\circ\text{C}.$$

Для схеми перехресна течія за основи беруться розрахунки по схемі «протитечія», які потім коректуються коефіцієнтом  $\varepsilon \leq 1$ .

При проектному розрахунку ТА кінцевою метою є визначення площі поверхні теплообміну в ТА. При відомих  $Q$ ,  $\Delta t_{cp}$ ,  $k$  вона визначається як:

$$F = \frac{Q}{k\Delta t_{cp}}, \text{ м}^2.$$

Ефективність роботи ТА зазвичай оцінюється умовним ККД: що

укладається в діапазон значень 0,6...0,7:  $\eta_{TA} = \frac{Q_2}{Q_{розп}} = \frac{w_2(t_2'' - t_2')}{w_1(t_1' - t_2')}$ .

**Задача 1.** В газоводяному рекуперативному теплообмінному апараті гарячими газами з початковою температурою 300 °С нагрівається за годину 1000 кг води від температури 10 °С до температури 80 °С. Витрата газів при цьому 2000 м<sup>3</sup>/год, їх масова густина 0,6 кг/м<sup>3</sup>, питома теплоємність  $C_r = 1,06 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}}$ . Коефіцієнт теплопередачі від гарячих газів до води 163  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$ . Визначити площу поверхні нагрівання в апараті, який виконаний за протитечійною схемою. Питома масова теплоємність води  $C_v = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$ .

### **Рішення:**

1. Рівняння теплового балансу в апараті:

$$Q_{1(г)} = Q_{2(в)} = Q \quad \text{або} \quad m_1 c_{p1} (t_1' - t_1'') = m_2 c_2 (t_2'' - t_2').$$

$$\text{Звідки:} \quad t_1'' = t_1' - \frac{m_2 c_2 (t_2'' - t_2')}{m_1 c_{p1}} = 300 - \frac{1000 \cdot 4,19 (80 - 10)}{1200 \cdot 1,06} = 70 \text{ } ^\circ\text{С},$$

$$\text{де } m_1 = V_1 \rho_1 = 2000 \cdot 0,6 = 1200 \frac{\text{кг}}{\text{год}}.$$

2. Площа поверхні теплообміну в апараті ( з рівняння теплопередачі):

$$F = \frac{Q}{k \Delta t_{cp}} = \frac{m_2 c_2 (t_2'' - t_2')}{k \Delta t_{cp}} = \frac{1000 \cdot 4,19 (80 - 70) \cdot 1000}{163 \cdot 123 \cdot 3600} = 4,1 \text{ м}^2,$$

де  $\Delta t_{cp}$  – середньоарифметичний перепад температур між теплоносіями:

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{t_1' - t_2''}{t_1'' - t_2'}} = \frac{(300 - 80) - (70 - 10)}{\ln \frac{300 - 80}{70 - 10}} = 123 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

### **Контрольні питання.**

1. Що розуміють під теплообмінним апаратом? Які існують види теплообмінних апаратів?
2. Які існують схеми руху теплоносіїв в теплообмінних апаратах?
3. Що розуміють під середнім температурним перепадом між теплоносіями?
4. Що розуміють під тепловим еквівалентом теплоносія?
5. Якими показниками характеризується ефективність роботи теплообмінного апарату?

### **Тема 19. Основні джерела теплоти в сільському господарстві.**

1. Головні джерела теплової енергії, яка використовується в сільському господарстві.
2. Водогрійні і парові котельні установки, водонагрівачі.
3. Теплогенератори і калорифери.

#### 4. Опалювально-вентиляційні агрегати і газові опалювальні прилади.

В сільському господарстві використовується енергія, яка виділяється при спалюванні твердого, рідкого і газоподібного палива, електрична енергія, а також енергія Сонця і глибинна теплота Землі (геотермальні води). Одержана теплота може бути передана споживачам при допомозі таких теплоносіїв як вода, водяна пара, повітря, димові гази.

До теплогенеруючих установок (ТГУ), які використовуються в сільському господарстві, відносяться: котельні установки (водогрійні і парові), теплогенератори, калорифери (пароводяні і електричні), опалювально-вентиляційні агрегати, водонагрівачі (ємнісні і проточні), опалювальні печі, газові опалювальні прилади.

**Котельні установки** (котли) – технічні пристрої призначені для одержання гарячої води або пари заданих параметрів.

**Водогрійні котли** характеризуються тепловою потужністю ( $\kappa Bm$ ,  $MBm$ ), тобто кількістю теплоти, яка виробляється в одиницю часу, і температурою гарячої води ( $^{\circ}C$ ).

**Парові котли** характеризуються трьома основними параметрами: *паропроодуктивністю* – масою водяної пари, що одержується в котлі за годину ( $\kappa g/год.$ ,  $t/год.$ ), манометричним тиском ( $\kappa Па$ ,  $МПа$ ) і температурою пари ( $^{\circ}C$ ).

Водогрійні котли підрозділяються на чавунні секційні, які гріють воду до  $115^{\circ}C$  і сталі зварні котли, які гріють воду до  $150^{\circ}C$ .

Водогрійні чавунні секційні котли за будовою схожі один на одного і відрізняються між собою тільки розмірами і конфігурацією секцій. За тепловою потужністю ці котли підрозділяють на три основні групи: малої (до  $230 \kappa Bm$ ) потужності (група КЧ-1), середньої (до  $1300 \kappa Bm$ ) потужності (група КЧ-2) і великої (до  $1800 \kappa Bm$ ) потужності (група КЧ-3).

Сталі зварні котли виготовляють з сталіних труб, які зварені в пакети різних конфігурацій. Це котли типу ТВГ (теплофікаційні водогрійні), які працюють на газовому паливі. Їх теплова потужність може досягати від  $5 MBm$  (котел ТВГ-4) до  $9,5 MBm$  (котел ТВГ-8). Температура води на виході із цих котлів досягає  $150^{\circ}C$ , а надлишковий тиск  $13 атм.$  ( $1280 \kappa Па$ ).

Пар, який виробляється паровими котлами, використовується для запарювання кормів, пастеризації молока, обробки молочного посуду, опалення виробничих приміщень. До таких котлів (як найбільш поширених) відносяться котел марки КВ-300М (паропроодуктивність  $400 \kappa g/год.$ , теплова потужність  $300 \kappa Bm$ , температура пари  $130^{\circ}C$ ) і котел марки Д-721А (паропроодуктивність  $900 \kappa g/год.$ , теплова потужність  $670 \kappa Bm$ , температура води  $115^{\circ}C$ ). Ці котли працюють на рідкому паливі. Широке розповсюдження одержали котли типу ДКВР (двобарабанні, водотрубно, реконструйовані) – котли з паропроодуктивністю  $2,5 \dots 10 t/год.$ , при надлишковому тиску пари  $1275 \kappa Па$  ( $\approx 13 атм$ ) з температурою пари  $195 \dots 250^{\circ}C$ . Вони можуть працювати на всіх видах палива (вугіллі, мазуті, газі).

**Водонагрівачі.** В системах місцевого опалення і гарячого водопостачання знаходять широке використання об'ємні газові водонагрівачі. Автоматичні

газові водонагрівачі виготовляються в декількох модифікаціях: АГВ-50; АГВ-80; АГВ-120 ємкістю відповідно 50, 80, 120 літрів. АГВ – уявляє собою циліндричний резервуар покритий теплоізоляцією і металевим кожухом. В середині резервуару проходить жарова труба. В нижній частині резервуару розміщена газова горілка з запальником. Теплова потужність АГВ від 4,9 до 10,5 *кВт*.

**Теплогенератори** – це технічні пристрої, які призначені для нагрівання потоку повітря за рахунок теплоти гарячих газів, одержаних при спалюванні рідкого палива (дизпалива). Теплогенератори часто використовуються в якості повітряного опалення і вентиляції теплиць, птахоферм, ремонтних майстерень, гаражів, а також сушіння різних сільськогосподарських культур (трави – способом активного вентилявання, зерна в сушарках), підсушування приміщень при внутрішніх будівельних роботах. Найбільше поширення одержали стаціонарні теплогенератори ТГ-75А, ТГ-150А, ТГ-1А, ТГ-2,5 і пересувні (на колесах) ТГП-400, ВТП-400. Ці теплогенератори повністю автоматизовані, компактні, відносно легкі, відповідають вимогам ергономіки і технічної естетики.

**Калорифери** – технічні пристрої, в яких повітря, яке подається вентилятором, проходить через теплообмінник, в якому нагрівається за рахунок теплоти гарячої води, водяної пари або електронагрівача. Пароводяний калорифер представляє собою два колектора з'єднаних між собою пакетом сталених трубок, розміщених в декілька рядів в напрямку руху повітря. Калорифери середньої моделі (КФС) мають три ряди трубок, калорифери великої моделі (КФБ) – чотири ряди.

Калориферна установка, як правило, уявляє собою пакети з двох або чотирьох калориферів. Для нагрівання значних (великих) об'ємів повітря при відносно невеликих перепадах температур застосовують паралельну установку калориферів. Для нагрівання повітря до більш високих температур калорифери встановлюють послідовно. Калорифери всіх типів і моделей ділять на номери, які відрізняються площею поверхні нагрівання і приєднувальними розмірами.

**Опалювально-вентиляційні агрегати.** В системах повітряного опалювання з зосередженою подачею нагрітого повітря широке використання знаходять опалювально-вентиляційні агрегати. Вони працюють при повній або частковій рециркуляції повітря приміщення. Опалювально-вентиляційні агрегати містять в собі пароводяний калорифер, вентилятор з електродвигуном і рухомі жалюзі для зміни напрямку повітряного потоку. Всі ці вузли знаходяться в загальному корпусі. На відміну від калориферів, що розміщуються в спеціальних приміщеннях будівлі і які подають нагріте повітря в розподіляючі канали, компактні опалювально-вентиляційні агрегати встановлюють безпосередньо в будівлі, що опалюється на кронштейнах (забитих в стінку) або на фундаментах. Для роботи цих агрегатів необхідно забезпечити в них подачу водяної пари з температурою до 180 °С або гарячої води з температурою 130 °С. Теплова потужність цих агрегатів складає від 58 до 233 *кВт* (при нагріванні повітря паром) і 35 ... 163 *кВт* при нагріванні водою).

**Газові опалювальні прилади.** До їх числа входить добре розповсюджений прилад «Огонек», який призначений для опалювання приміщень площею до  $120\text{ м}^2$ . Його теплова потужність  $1,8\text{ кВт}$ , температура нагрітого повітря  $70\text{ }^\circ\text{C}$ , розміри  $744\times138\times600\text{ мм}$ , маса  $70\text{ кг}$ , к.к.д. до  $80\%$ . «Огонек» – це повітрянагрівач, який складається з теплообмінника і газової горілки, які закриваються сталевим кожухом. Горілка і газовий тракт приладу повністю ізольовані від повітря приміщення. Робота приладу повністю автоматизована в залежності від температури приміщення. Досить рідко, але застосовується для опалення тваринницьких приміщень газові горілки інфрачервоного випромінювання (ГИИ). Це опалювальні прилади для безполум'яного спалювання газу. В цих горілках газоповітряна суміш проходить через блок керамічних плиток з великою кількістю отвір-каналів діаметром  $0,8\dots1,6\text{ мм}$ . В цих каналах суміш нагрівається до температури самозаймання і згоряє на самій поверхні блоку плиток, створюючи рівне коротко-факельне полум'я. Зовнішня поверхня цих плиток розігрівається до температури  $800\dots900\text{ }^\circ\text{C}$ . Більша частина теплоти від плиток до повітря приміщення передається у вигляді променевої енергії інфрачервоного випромінювання. В горілках відбувається практично повне згоряння газу. Теплова потужність таких горілок складає  $2,8\dots5,2\text{ кВт}$ .

Вибір конкретних джерел теплоти – досить складна задача, яка залежить від багатьох чинників: типу приміщення, його призначення, виду тварин, що знаходяться в приміщенні, умов їх утримання, типу вентиляції приміщення, способом установки опалювально-вентиляційного обладнання, протипожежних вимог до нього, зручністю його ремонту і обслуговування і т. д.

### **Контрольні питання.**

1. Які теплоносії використовуються в теплотехнічних установках, які знаходяться в сільському господарстві?
2. Які теплогенеруючі установки найшли застосування в сільськогосподарському виробництві?
3. На які характерні групи розподіляються водогрійні котли, якими параметрами характеризується їх робота?
4. На які групи (серії) підрозділяються парові котли, якими параметрами характеризується їх робота?

### **Тема 20. Основні споживачі теплоти в сільському господарстві.**

1. Основні споживачі теплоти в сільському господарстві.
2. Санітарно-гігієнічні вимоги до повітря в приміщеннях.
3. Тваринницькі приміщення.
4. Культиваційні споруди (теплиці).
5. Сушарки.

До основних споживачів теплоти в сільському господарстві відносяться:

- житлові та адміністративні будівлі, гуртожитки;
- навчальні заклади, школи, їдальні, клуби, магазини, кінотеатри;

- дитячі садки, амбулаторії, лікарні;
- бані;
- реммайстерні;
- гаражі;
- тваринницькі приміщення;
- птахарні;
- культивацийні споруди (теплиці);
- сушарки;
- сховища сільськогосподарської продукції та ін.

Щоб підтримувати в цих приміщеннях необхідний мікроклімат (температуру, вологість, швидкість переміщення повітря) на протязі всього року, будівлі, споруди, повинні бути обладнані системами опалення і вентиляції повітря.

Для холодного періоду року розрахункова внутрішня температура повинна відповідати санітарно-гігієнічним вимогам, які пред'являються до конкретного приміщення: температура (в залежності від призначення приміщення) 10...20 °C; відносна вологість повітря не більше 75%; швидкість переміщення повітря в приміщенні не більше 0,3 м/с.

Сприятливе навколишнє середовище стимулює життєві процеси в організмі тварини і сприяє підвищенню їх продуктивності. Мікроклімат (температура, вологість, склад (забрудненість) і швидкість руху повітря) в тваринницьких і птахівничих приміщеннях повинні відповідати зоогігієнічним вимогам.

При зниженій температурі і високій вологості повітря в приміщенні надої корів можуть знижуватись на 30...40%, а приріст тварин, що відгодовуються, на 40...50%. Негативно впливає на тварин і підвищена температура навколишнього середовища. Особливо чутливі до зміни мікроклімату птахи. Зниження температури повітря в птахарні (пташнику) на 1 °C проти нормальної (16 °C – для курей, 18 °C – для індичок, 14 °C для уток і гусей) викликає збільшення споживання корму і зменшення яйценосності на 2...3%. Оптимальні температури в приміщенні: для корів – 8...10 °C, для телят – 14...15 °C, для свиней – 17...18 °C.

Відносна вологість повітря і його швидкість руху в приміщенні для всіх тварин складає 40...75%, 0,2...0,3 м/с. Протягів в приміщення не повинно бути. В зимовий період тварини (і птиці) протягом довгого часу знаходяться в закритих приміщеннях, в яких повітря постійно зазнає систематичного забруднення і псування шкідливими виділеннями в вигляді вологи, пилу, вуглекислого газу, аміаку, сірководню та ін. Кількість виділень залежить від виду і маси тварини (і птиці). При поганій вентиляції приміщення тварини становляться млявими, у них погіршується апетит, знижується продуктивність, з'являються різні хвороби.

Обмін повітря в тваринницьких приміщеннях в зимовий період повинен бути: для корів і дорослого молодняку 17 м<sup>3</sup>/год. на 100 кг маси тварини; для телят і свиней не менше 20 м<sup>3</sup>/год. на 100 кг маси тварини. Для птиці – не менше 0,7 м<sup>3</sup>/год. на 1 кг живої маси.

Природний обмін повітря не може забезпечити достатню вентиляцію, тому тваринницькі і птахівничі приміщення повинні бути обладнані вентиляційними пристроями, які подають в приміщення свіже повітря і одночасно видаляють забруднене. Об'єм підвідного повітря визначають з розрахунку розчинення вуглекислоти до допустимої концентрації,  $L_{CO_2}$  і граничнодопустимого вмісту водяної пари,  $L_w$ . Необхідний обмін повітря приймається по найбільшій з двох величин  $L_{CO_2}$  або  $L_w$ ,  $m^3/год$ . Вірність розрахунків може бути перевірена по кратності повітрообміну в приміщенні:

$$K = \frac{L}{V}, \text{ де } V - \text{об'єм приміщення, } m^3.$$

Остання повинна бути для корівників 3...4; для телятників і свинарників 5...6; для пташників 10...12.

**Культиваційні споруди.** Це споруди, в яких створюється мікроклімат, необхідний для позасезонного вирощування рослин (утеплений ґрунт, парники, теплиці).

Обігрів таких приміщень проводиться за рахунок сонячної радіації, біопалива (гною), різних технічних пристроїв. Технічний обігрів – найбільш надійний спосіб підтримання оптимальної температури повітря і ґрунту в парниках і теплицях. Він може бути водяним, повітряним, газовим, електричним, комбінованим (водяним з повітряним).

Джерелами теплопостачання теплично-парникових господарств можуть бути центральні котельні і спеціалізовані котельні, які побудовані спеціально для таких господарств, теплові відходи промислових виробництв (тепла вода), теплових електростанцій, теплогенератори, електричні та газоповітряні калорифери, а також геотермальні води.

Теплиці (блочні, ангарні, баштові) – найбільш досконалі споруди захищеного ґрунту. Тут обслуговуючий персонал знаходиться всередині теплиці, виконуючи всі необхідні агротехнічні заходи по догляду за рослинами з використанням пристроїв по механізації робіт.

Найбільш економічним видом опалення теплиць є газовий обігрів (менша витрата палива, простота конструкції опалювальної системи, бо відпадає необхідність в котельні, теплових мережах). Крім того, газ, який не має сірчаних з'єднань, можна спалюватися прямо в теплиці. Вуглекислий газ, який виділяється при цьому, використовується рослинами для фотосинтезу, що підвищує до 40% їх врожайність.

Обігрів теплиць горілками інфрачервоного випромінювання дозволяє підтримувати на необхідному рівні температуру ґрунту і рослин без нагрівання до тієї ж температури усього об'єму теплиці.

**Сушіння продукції сільськогосподарського виробництва. Зерносушарки.**

В сільськогосподарському виробництві часто доводиться займатися сушінням зерна, овочів, ягід, зелених кормів для тварин і птиці. Зерно – основний продукт сільськогосподарського виробництва, поступаючи на хлібоприймальні пункти, воно має підвищену вологість (іноді до 26...28%) і тому не підходить для довгого зберігання (із-за самонагрівання і псування). Для збереження зібраного урожаю вологе зерно сушать до кондиційної вологості

(14...15%). Статичні дані підтверджують, що для зниження вологості зерна, наприклад, на 6% (з 20% до 14%) кожен рік треба підсушувати до 35...40% валового збору зерна.

Сушіння – процес не тільки теплотехнічний, але і технологічний. Воно прискорює процес дозрівання свіжозібраного зерна і зберігає його енергію проростання (насіннєве зерно), якщо не буде допущено перегріву ( $t_3 > 50...60$  °C). Крім того, якщо зерно підсушене, продуктивність і якість продукції мукомольно-круп'яних підприємств підвищуються при помітному зменшенні витрат електроенергії і зниженню зносу основного обладнання (млина, сита).

Сушіння видаляє значну кількість вологи з картоплі, плодів та овочів. Після сушіння вологість сушеної картоплі не перевищує 12 %, овочів – 14%, плодів, ягід – 18...20%.

Сушені продукти мають велике значення для постачання цих продуктів армії, різним експедиціям, населенню. Сушені продукти помітно підвищують економічність їх транспортних перевезень. Тому найбільш раціональне сушіння сільськогосподарської продукції на місцях її виробництва.

Одним із ефективних способів заготовки кормів з високим вмістом поживних речовин, вітамінів, мікроелементів являється штучне сушіння трав – досушування сіна активним вентиляванням підігрітим повітрям і виробництво вітамінної муки.

Будь-який вологий матеріал складається з абсолютно сухої речовини і вологи. Відношення маси вологи  $m_{\text{вол}}$  до маси вологого матеріалу виражене у відсотках називається **вологістю матеріалу**.

**Сушіння** – це видалення надлишкової вологи із матеріалу, може бути виконане різними способами:

1. Тепловим.
2. Механічним (центрифугуванням).
3. Сорбційним (змішування на деякий час вологого матеріалу з вологопоглиначем).
4. Сублімаційним (зневоднювання попередньо заморожуваного матеріалу в вакуумі).

Для більшості матеріалів теплове сушіння – основний спосіб зменшення їх вологості. Воно може бути природним (натуральним, за рахунок сонячної енергії) і штучним (за рахунок технічних пристроїв, які генерують тепло).

При сушінні теплота може бути передана вологому матеріалу різними способами: кондиційним (контактним), конвективним, радіаційним (променевим). Найбільше використання в сільському господарстві отримало конвективне сушіння, при якому рухомий сушильний агент (гаряче повітря, гарячі гази – суміш димових газів з навколишнім повітрям) конвекцією передає теплоту матеріалу, який підсушується і виносить поглинену вологу.

Конструкції конвективних сушарок дуже різноманітні:

1. **Лоткові** (сушарки періодичної дії, сушильну камеру яких завантажують і розвантажують – на лотки із дірчатого листового заліза. Сушильний агент в них продувається вентилятором через шар вологого матеріалу, підсушує його і виходить в навколишню атмосферу).

2. **Конвеєрні** (сушарки безперервної дії, в яких на рухому перфоровану стальну стрічку подається вологий матеріал. Сушильний агент проходить через отвори в стрічці і шар матеріалу нагріває його, поглинає вологу і виводиться в навколишнє середовище).

3. **Шахтні** сушарки (колонкові, жалюзійні сушарки з коробами) одержали найбільше розповсюдження. В них вологе зерно заповнює вузькі вертикальні колонки з дірчатих сталених листів, або простір між полицями жалюзі, або між коробами. Агент сушіння надходить в шахту, пронизує шари зерна і виходить назовні. Підсушене зерно рухається вниз під дією своєї ваги.

4. **Сушарки з «киплячим» шаром**, в яких зерно під дією потоку агента, що подається до вологого зерна з швидкістю 1,2 м/с переходить в псевдо рідинний стан і як би «кипить». При цьому має місце добре перемішування і рівномірне підсушування зерна.

5. **Барабанні** сушарки використовують для сушіння зерна різних культур, насіння трав, а також зеленої маси конюшини, люцерни та інших трав. Сушильна камера в таких сушарках представляє собою барабан, який обертається і в який подається вологий матеріал (при будь-якій початковій вологості) і суміш топкових (димових) газів з повітрям. При повільному обертанні барабана лопаті, які знаходяться в середині барабана, підхоплюють і пересипають знизу вверху підсихаючий матеріал, а потік теплоносія направляє його до розвантажувальної камери.

6. **Пневматичні** сушарки, в яких процес сушіння вологого матеріалу відбувається в вертикальній трубі в потоці теплоносія (нагріте в калорифері повітря), який піднімається вгору зі швидкістю 20 м/с. На практиці найбільше використання одержали шахтні зерносушарки СЗС-8, а для сушіння овочів – конвеєрні стрічкові сушарки ПКС-20.

Вітамінну трав'яну муку виробляють із зелених кормів в сушильних установках (агрегатах вітамінної муки) АВМ-0,4; АВМ-0,65; АВМ-1,5; АВМ-3,0 (в цих пристроях цифри характеризують їх продуктивність в т/год).

Більшість зерносушарок, крім сушильної камери обладнано ще й охолоджувальною камерою, в якій підсушений матеріал охолоджується атмосферним повітрям.

### Контрольні питання.

1. Які об'єкти в сільській місцевості (та виробництві) виступають в якості споживачів теплоти?
2. Як класифікуються системи опалення та з яких основних елементів вони складаються?
3. Якими параметрами оцінюються мікроклімат в приміщеннях сільськогосподарського призначення?
4. Як класифікуються системи вентиляції виробничих приміщень?
5. Як класифікуються теплові мережі? Призначення теплокомпенсаторів?
6. Параметри мікроклімату в тваринницьких приміщеннях.
7. Що розуміють під кратністю повітряобміну в приміщенні?
8. Основні шкідливості (небезпеки) в тваринницьких приміщеннях.

- 9.** Які фактори беруться за основу для розрахунку повітряобміну в приміщенні?
- 10.** Що розуміють під культиваційними спорудами? Як вони класифікуються?

## ЛІТЕРАТУРА.

1. Миронов О.С., Брижа М.С., Бойко В.Б., Золотовська О.В. Теплотехніка: основи термодинаміки, теорія теплообміну, використання тепла в сільському господарстві. Підручник. - Дніпропетровськ: ТОВ "ЕНЕМ", 2011. – 424 с.
2. Герасимов Г.Г. Теоретичні основи теплотехніки. Навч. посібник. - Рівне. НУВГП, 2011 -382 с.
3. Константинов С.М., Панов Є.М. Теоретичні основи теплотехніки: Підручник. – К.: «Золоті Ворота», 2012. – 592 с.
4. Гнатишин, Я. М. Теплотехніка: Навч. посіб. / Я.М. Гнатишин, В.І. Криштапович. — Київ : Знання, 2008. — 364с.
5. Дідур В. А. Теплотехніка, теплопостачання і використання теплоти в сільському господарстві / В. А. Дідур, М. І. Стручаєв. – К. : Аграрна освіта, 2008. – 233 с.
6. Приходько М.А., Герасимов Г.Г. Термодинаміка та теплопередача. Навчальний посібник. - Рівне: НУВГП, 2008.- 250 с.
7. Драганов Б.Х., Бессараб О.С., Долінський А.А., Лазоренко В.О., Міщенко А.В., Шеліманова О.В. (за ред. Б.Х. Драганова). Теплотехніка: Підручник. – 2-е вид., перероб. і доп. – Київ: Фірма «ІНКОС», 2005. – 400 с.
9. Дідур В.А. та ін. Гідравліка та її використання в агропромисловому комплексі / В. А. Дідур., О.Д. Савченко, Д.П. Журавель, С.І. Мовчан. – К. : Аграрна освіта, 2008. – 577 с.
10. Дідур В.А. та ін. Гідравліка, сільськогосподарське водопостачання та гідропневмопривод / В.А. Дідур., О.Д. Савченко, С.І. Пастушенко, С.І. Мовчан. – Запоріжжя : Прем'єр, 2005. – 464 с.
11. Левицький, Б.Ф. Гідравліка. Загальний курс [Текст] / Б.Ф. Левицький, Н.П. Лещій. -Львів: Світ, 1994. - 264 с.
12. Гідравліка: Навчально-методичний комплекс. Навчально-методичний посібник / В.І. Дуганець, І.М. Бендера, В.А. Дідур та ін. / За ред. В.І Дуганця, І М. Бендери, В.А. Дідура. – Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В., 2013. – 572 с.
13. Боярчук В. М. Теплотехніка та використання теплоти: практикум / В. М. Боярчук, Я. В. Шолудько, В. П. Шолудько, І. М. Бендера. – Львів : Солом, 2010. – 232 с.
14. Константинов С.М. Збірник задач з технічної термодинаміки та теплообміну: Навч. посіб. / С.М. Константинов, Р.В. Луцик. – К.: Видавництво «Освіта України», 2009. – 543 с.
15. Дев'яткіна С.С. Альтернативні джерела енергії : Навч. посіб. / С. С. Дев'яткіна, Т. Ю. Шкварницька; Нац. авіац. ун-т. - К., 2006. - 92 с.

**16.** Сінчук І.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : навч. посіб. / І. О. Сінчук, С. М. Бойко, К. І. Лосіна, І. А. Луценко, Г. І. Ткаченко; ред.: О. М. Сінчук. - Кременчук : Щербатих О.В., 2013. - 192 с.

**17.** Сиротюк С.В. Альтернативні джерела енергії. Енергія вітру: Навч. посіб./ С.В. Сиротюк, В.М. Боярчук, В.П. гальчак. - Львів: "Магнолія 2006", 2018. - 182 с.

**18.** Енергоощадність та альтернативні джерела енергії: навч. посібник / М. Й. Олійник, В. Г. Лисяк, О. Б. Дудурич; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. М. С. Сегеди. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. - 184 с.

## ЗМІСТ

|     |                                                                            |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.  | Робоче тіло і параметри його стану.                                        | 5  |
| 2.  | Лабораторна робота № 1.<br>Перевірка пружинних манометрів.                 | 7  |
| 3.  | Лабораторна робота № 2.<br>Вимірювання гідростатичного тиску.              | 11 |
| 4.  | Газові суміші.                                                             | 16 |
| 5.  | Теплоємність.                                                              | 18 |
| 6.  | Перший закон термодинаміки і основні термодинамічні процеси.               | 20 |
| 7.  | Другий закон термодинаміки і термодинамічні цикли ДВЗ та ГТУ.              | 24 |
| 8.  | Лабораторна робота № 3.<br>Вивчення стану відносного спокою рідини.        | 29 |
| 9.  | Лабораторна робота №4. Дослідження режимів течії рідини.                   | 34 |
| 10. | Лабораторна робота № 5. Визначення втрат напору по довжині<br>трубопроводу | 38 |
| 11. | Водяна пара і теоретичні цикли ПСУ.                                        | 46 |
| 12. | Вологе повітря.                                                            | 52 |
| 13. | Холодильні установки.                                                      | 55 |
| 14. | Теплопровідність.                                                          | 59 |
| 15. | Конвективний теплообмін.                                                   | 62 |
| 16. | Променевий теплообмін.                                                     | 65 |
| 17. | Складний теплообмін. Теплопередача.                                        | 68 |
| 18. | Теплообмінні апарати та їх розрахунок.                                     | 72 |
| 19. | Основні споживачі теплоти в сільському господарстві.                       | 77 |
|     | Література.                                                                | 83 |

Сіренко Віктор Федорович  
Сіренко Юлія Володимирівна  
Вольвач Тетяна Сергіївна

***ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ГІДРАВЛІКА***  
***МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ***  
***щодо виконання лабораторних робіт***

м. Суми, РВВ, Сумський національний аграрний університет,  
вул. Г. Кондратьєва, 160.

---

Підписано до друку: листопад 2023 р.      Формат А5      Гарнітура. Times  
New Roman.  
Тираж: \_\_\_\_\_ примірників. Замовлення \_\_\_\_\_ Ум. друк. арк. 3,0

---



