

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства  
та природокористування

Кафедра Гідроенергетики, теплоенергетики і гідравлічних машин

**01-06-98М**

### **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних робіт та самостійної роботи  
з дисципліни **«Теплотехніка та теплоенергетичні установки  
сільськогосподарського призначення»**  
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня  
за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія»  
спеціальності 208 «Агроінженерія»  
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-методичною  
радою з якості ННІМІ  
Протокол № 2 від 02 жовтня 2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт та самостійної роботи з дисципліни «Теплотехніка та теплоенергетичні установки сільськогосподарського призначення» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія» спеціальності 208 «Агроінженерія» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Кочмарський В. З. – Рівне : НУВГП, 2024. – 60 с.

Укладач: Кочмарський В. З. – к.ф.-м.н., професор, професор кафедри Гідроенергетики, теплоенергетики і гідравлічних машин.

Відповідальний за випуск: Рябенко О.А., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Гідроенергетики, теплоенергетики і гідравлічних машин.

Керівник групи забезпечення спеціальності  
Бундза Олег Зіновійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії.

Попередній варіант 034-147

© В. З. Кочмарський, 2024

© НУВГП, 2024

## Загальні вказівки до виконання робіт

**Мета робіт.** Закріплення і поглиблення знань та розуміння основних законів термодинаміки та їх застосування при вивченні основ теплотехніки, зокрема, при аналізі принципів роботи теплоенергетичних установок в агроінженерії. Під теплоенергетичними установками розуміємо джерела теплоти такі як котельні установки, теплообмінники, двигуни внутрішнього згорання різного типу, компресори, сушильні агрегати та теплові насоси

**Зміст робіт.** Вивчення правил техніки безпеки роботи з установками в лабораторії. Вивчення основних законів термодинаміки, що стосуються даної роботи, знайомство зі схемою та будовою лабораторної установки за допомогою якої вивчається той, чи інший термодинамічний закон. Вивчення основних вимірювальних приладів, що використовуються в дослідженнях, зокрема, границь вимірювання, ціни поділки шкали та похибок вимірювання. Знайомство і вивчення інструкцій з експлуатації спеціалізованих установок, теплообмінників, двигунів внутрішнього згорання чи компресорів, які досліджуються. Набуття навиків складати звіти про виконані роботи та робити аналіз результатів вимірювань і розрахунків.

### Лабораторна робота № 1

**Тема:** Рівняння стану ідеального газу та його наслідки.

**Мета роботи:** Дослідна перевірка рівняння стану та закону Шарля для повітря.

#### 1.1 Теоретичні відомості

**Ідеальний газ (ІГ)** – це сукупність невзаємодіючих між собою матеріальних точок. Рівновага в такому газі встановлюється завдяки взаємодії його частинок зі стінками посудини в якій він знаходиться.

**Термодинамічні параметри** – величини, які описують фізичні властивості (характеризують стан) ІГ чи іншої термодинамічної системи (ТДС). ТДС- одне, або декілька тіл, що складаються з великого ( $N > 10^9$ ) числа атомів чи молекул. Параметри стану умовно ділять на **термічні та калоричні**. До термічних параметрів стану відносяться **абсолютний тиск, питомий об'єм і абсолютна температура**.

**Абсолютний тиск** – середня сила з якою діють сукупності молекул газу на стінку посудини, віднесена до одиниці площі її поверхні,

$$P = \frac{F}{S}, \quad (1.1)$$

$F$  – сила, Ньютон (Н)  $S$  – площа, м<sup>2</sup>;  $P$  – вимірюється у Па. 1 Па = 1Н/м<sup>2</sup>, є також і інші, позасистемні, одиниці вимірювання тиску:

**технічна атмосфера** 1ат = 735,6 мм.рт.ст.= 10м.вод.ст. = 1кгс/см<sup>2</sup> = 98100Па = 98,1 кПа.

**фізична атмосфера** 1атм = 760мм.рт.ст. = 10,333м.вод.ст. = 1,0333 кгс/см<sup>2</sup>= 1,0132бар = 101325 Па =101.325 кПа.

**Питомий об'єм** – об'єм, який займає одиниця маси речовини ,  $v = V/m$ , одиниця вимірювання м<sup>3</sup>/кг.

**Абсолютна температура** – параметр, що характеризує ступінь нагрітості тіла. З точки зору молекулярно-кінетичної теорії температура є мірою інтенсивності теплового руху молекул, пропорціональна середній кінетичній енергії теплового руху молекул.

**Функціональну залежність** між термічними параметрами стану

$$f(P, v, T) = 0$$

називають **термічним рівнянням стану**.

Залежно від кількості маси газу рівняння стану має різний вигляд:

- для одного кг ( рівняння Клапейрона):

$$P \cdot v = R \cdot T, \quad (1.2)$$

- для довільної маси:

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T, \quad (1.3)$$

- для одного кіломоля ( рівняння Клапейрона - Менделєєва):

$$P \cdot v_{\mu} = R_{\mu} \cdot T, \quad (1.4)$$

$V$  - об'єм, м<sup>3</sup>;  $P$  – абсолютний тиск, Па;  $v$  - питомий об'єм, м<sup>3</sup>/кг;  $v_{\mu}$  - мольний об'єм, м<sup>3</sup>/моль;  $R_{\mu} = 8314$  Дж/(кмоль·К) - універсальна газова стала, **однакова для всіх газів**;  $m$  – маса газу, кг;  $T$  – абсолютна температура, К;  $R$  - питома газова стала, Дж/(кг·К), її розраховують за формулою:

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu}, \quad (1.5)$$

$\mu$  - молекулярна маса газу, кг/кмоль.

Зв'язок між термічними параметрами стану (1, 2 ...n) ідеального газу в термодинамічному процесі описується об'єднаним рівнянням стану:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \dots = \frac{P_n V_n}{T_n}, \quad \text{або} \quad \frac{PV}{T} = \text{const} \cdot \quad (1.6)$$

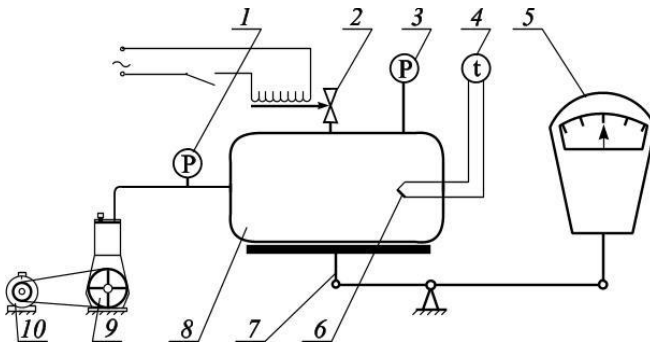
**Часткові випадки об'єднаного газового закону**, що описують основні процеси з ідеальним газом:

*ізохорний процес*:  $V = \text{const}$ , закон Шарля  $\frac{P}{T} = \text{const}$ ;

*ізотерічний процес*:  $T = \text{const}$ , закон Бойля-Маріотта  $P \cdot V = \text{const}$ ;

*ізобарний процес*:  $P = \text{const}$ , закон Гей-Люсака  $\frac{V}{T} = \text{const}$ .

## 1.2 Схема і опис лабораторної установки



**Рис. 1.1.** Схема лабораторної установки.

Установка складається зі сталюого балона 8 об'ємом  $0,04 \text{ м}^3$ , котрий системою важелів 7 з'єднаний з вагами 5. Для заповнення балона повітрям використовуємо компресор 9 який приводиться у дію електродвигуном 10. Випуск з балона 8 стисненого повітря забезпечується електроклапаном 2. Надлишковий (манометричний) тиск повітря в балоні контролюється манометром 1. Тиск та температура стисненого повітря у балоні фіксуються приладами 3 та 4 на кругових діаграмах. Прилад 4 з'єднаний з термопарою 6, що міститься в балоні.

### 1.3 Порядок виконання роботи

3.1. Записати величину атмосферного (барометричного) тиску  $P_6$ , температуру атмосферного повітря  $t_0$ , початкові покази ваги  $G_0$  та надлишкового тиску у балоні  $P_{\text{над. 0}}$ .

3.2. Компресором наповнювати повітря у балон до тиску  $0,5 - 0,7$  МПа (конкретну величину задає викладач). В результаті роботи нагнітання температура повітря в балоні зростає.

3.3. Припинити нагнітання. Температура газу в балоні знижується. Через кожні два градуси зниження температури записувати поточні значення надлишкового тиску  $P_{\text{над. i}}$ , покази ваги  $G_i$  та температуру  $t_i$ .

3.4. Дослід припинити при стабілізації температури. Реально записують 3 - 5 поточних значень параметрів (вказує викладач).

3.5. Дослідні дані записати у таблицю 1.1.

**Таблиця 1.1.**

Результати вимірювань та розрахунків.

№ п/п	$P_6$ , мм.рт.ст	$P_{\text{над, ат}}$	$P_{\text{абс, Па}}$	$G$ , кг	$t$ , °C	$T$ , К	$\Delta m$ , кг	$\Delta G$ , кг	$\delta_M$ , %	$P/T$ , Па/К	$\delta_{\text{ш}}$ , %
0							-	-	-	-	-
1											
2											
3											
Сер.											

### 1.4 Обробка результатів досліді

4.1. Визначити декілька значень абсолютного тиску повітря в балоні 8:

$$P_{\text{абс}} = P_6 + P_{\text{над}}, \text{ Па} . \quad (1.7)$$

$$P_6 = \frac{\cdot 101325}{760} = \text{Па};$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{над}0} &= \cdot 98100 = && \text{Па;} \\
P_{\text{над}1} &= \cdot 98100 = && \text{Па;} \\
P_{\text{над}2} &= \cdot 98100 = && \text{Па;} \\
P_{\text{над}3} &= \cdot 98100 = && \text{Па;} \\
P_{\text{абс}0} &= && \text{Па;} \\
P_{\text{абс}1} &= && \text{Па;} \\
P_{\text{абс}2} &= && \text{Па;} \\
P_{\text{абс}3} &= && \text{Па.}
\end{aligned}$$

4.2 За рівнянням стану розрахувати масу повітря в балоні для кожної  $i$  - тої точки ( $i = 0, 1, 2, 3$ ).

$$P_{\text{абс}i} \cdot V = m_i \cdot R \cdot T_i,$$

$$m_i = \frac{P_{\text{абс}i} \cdot V}{R \cdot T_i}, \text{ кг.}$$

$V = 0,04 \text{ м}^3$  – об'єм балону,  $R$  – питома газова стала, для повітря

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu} = \frac{8314}{29} = 286.7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$m_0 = \frac{P_{\text{абс}0} \cdot V}{R \cdot T_0} =$$

$$m_1 = \frac{P_{\text{абс}1} \cdot V}{R \cdot T_1} =$$

$$m_2 = \frac{P_{\text{абс}2} \cdot V}{R \cdot T_2} =$$

$$m_3 = \frac{P_{\text{абс}3} \cdot V}{R \cdot T_3} =$$

4.3 Обчислити зміну маси повітря

$$\Delta m_i = m_i - m_0, \text{ кг.} \quad (1.8)$$

$$\Delta m_1 =$$

$$\Delta m_2 =$$

$$\Delta m_3 =$$

та визначити прямими вимірюваннями за допомогою ваг 5:

$$\Delta G_i = (G_i - G_0) \cdot \xi, \text{ кг}, \quad (1.9)$$

$\xi$  - коефіцієнт корекції вагової системи, його величина дається викладачем.

$$\Delta G_1 =$$

$$\Delta G_2 =$$

$$\Delta G_3 =$$

4.4 Розрахувати комплекс  $P_i/T_i$  у законі Шарля та його середнє:

$$\left(\frac{P}{T}\right)_{\text{ср}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{T_i}\right)}{n}, \quad \frac{\dot{V}_a}{\hat{E}}. \quad (1.10)$$

$$\frac{P_1}{T_1} = \quad \frac{P_2}{T_2} = \quad \frac{P_3}{T_3} = \quad \left(\frac{P}{T}\right)_{\text{н\ddot{o}}}$$

4.5 Визначити відносні похибки з якими можемо перевірити чинність рівняння стану нашою вимірною системою:

$$\delta_{M_i} = \frac{|\Delta m_i - \Delta G_i|}{\Delta G_i} \cdot 100\%, \quad (1.11)$$

$$(1.11)$$

$$\delta_{M1} =$$

$$\delta_{M2} =$$

$$\delta_{M3} =$$

Те ж саме зробити для закону Шарля:



$$\delta_{ш} = \frac{\frac{P_i}{T_i} - \left(\frac{P}{T}\right)_{ср.}}{\left(\frac{P}{T}\right)_{ср.}} \cdot 100\% \quad (1.12)$$

$$\delta_{ш 1} =$$

$$\delta_{ш 2} =$$

$$\delta_{ш 3} =$$

4.6 Результати обчислень за (1.11) та (1.12) записати у таблицю 1.1 та зробити висновки.

### **Висновки:**

1.

2.

### **1.5 Контрольні запитання**

5.1. Що таке ідеальний газ? За яких умов поведінка реальних газів наближається до ідеального?

5.2. Дайте характеристику термічним параметрам стану і запишіть їх одиниці вимірювання в СІ.

5.3. Запишіть рівняння стану для 1 кг, довільної маси та 1 кмоль ідеального газу.

5.4. Запишіть формулу, що виражає зв'язок між питомою та універсальною газовими сталими, вкажіть їх розмірності.

5.5. Сформулюйте та запишіть об'єднаний і часткові випадки газових законів. Наведіть приклади реальних процесів, що близькі до основних процесів з ідеальним газом.

5.6. Поясніть, що таке манометричний, барометричний та абсолютний тиски? Який між ними зв'язок? Запишіть та поясніть взаємозв'язок між одиницями тиску.

### **Література**

1. Приходько М.А., Герасимов Г.Г. Термодинаміка та теплопередача. Рівне, 2008, - 250 ст.

2. Алабовский А.Н., Недужий И.А. Техническая термодинамика и теплопередача. Киев: Высшая школа, 1990.-255 с.
3. Драганов Б.Х., Долінський А.А., Міщенко А.В., Письменний Є.М. і ін. Теплотехніка.- Київ: „ІНКОС”, 2005.- 504 с.
4. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. – Підруч. для студ. енерг. спец. вищ. навч. закл. – Київ: Техніка, 2006. – 320 с.
5. Константинов М.С. Теплообмін: Підручник. – Київ: ВПІ ВПК „Політехніка”: Інрес, 2005. – 304 с.

### Лабораторна робота № 2

**Тема:** Теплоємність газів.

**Мета роботи:** Дослідним шляхом визначити масову, мольну та об’ємну ізобарні теплоємності повітря.

#### 2.1 Загальні відомості

**Питома теплоємність** – кількість теплоти, яку необхідно надати *одиниці кількості* робочого тіла, щоб змінити його температуру на  $1^{\circ}\text{K}$ .

**Масовою питомою теплоємністю** називають кількість теплоти, якою *один кілограм* робочого тіла повинен обмінятися з навколишнім середовищем, здійснюючи процес типу  $x$ , щоб його температура змінилася на  $1^{\circ}\text{K}$

$$c_x = \frac{\Delta Q_x}{m \cdot \Delta t}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}; \quad (2.1)$$

$\Delta Q_x$  - кількість теплоти в процесі  $x$ , наприклад, ізобарному чи ізохорному, яка необхідна, щоб маса тіла,  $m$ , кг, змінила температуру на  $\Delta t = t_2 - t_1$  градусів.

**Об’ємною питомою теплоємністю** називається кількість теплоти, якою *один метр кубічний* речовини (при нормальних умовах) повинен обмінятися з навколишнім середовищем, здійснюючи процес типу  $x$ , щоб температура тіла змінилася на один градус,

$$c'_x = \frac{\Delta Q_x}{V_0 \cdot \Delta t}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{K}}; \quad (2.2)$$

$V_0$  - об’єм тіла, приведений до нормальних термодинамічних умов,  $\text{м}^3$ ;

Об’єм робочого тіла приводиться до нормальних термодинамічних умов за допомогою рівняння об’єднаного газового закону:

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{PV}{T}, \quad (2.3)$$

$P_0 = 760$  мм. рт.ст. = 101325 Па,  $T_0 = 273,15$  К – тиск та температура при нормальних термодинамічних умовах;  $P, V, T$  – тиск, об'єм та температура при даних умовах.

**Мольною теплоємністю** називається кількість теплоти, якою **один кіломоль** робочого тіла повинен обмінятися з навколишнім середовищем, здійснюючи процес типу  $x$ , щоб температура тіла змінилася на один градус,

$$\mu c_x = \frac{\Delta Q_x}{v \cdot \Delta t}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}, \quad (2.4)$$

$v$  - кількість кіломолів робочого тіла, кмоль.

$$v = m/\mu \quad \text{або} \quad v = V_0 / 22,4; \quad (2.5)$$

$\mu$  - мольна маса; 22,4 – мольний об'єм газу при нормальних термодинамічних умовах;  $x$  - характеризує вид термодинамічного процесу ( $c_p$  – ізобарна теплоємність;  $c_v$  – ізохорна теплоємність);  $\mu$  – ознака мольної теплоємності.

Деякі мольні теплоємності ідеальних газів подані в табл. 2.1.

**Таблиця 2.1**

Величини мольних теплоємностей ідеальних газів.

Газ	Мольна теплоємність, $\frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$	
	$\mu c_v$	$\mu c_p$
Одноатомний	12,5	20,8
Двоатомний	20,8	29,1
Три і багатоатомний	29,1	37,4

Формули зв'язку між масовою, об'ємною та мольною теплоємностями мають вид:

$$c_x = \frac{\mu c_x}{\mu} = c'_x \cdot v, \quad (2.6)$$

$$c'_x = \frac{\mu c_x}{22,4} = c_x \cdot \rho. \quad (2.7)$$

Для ідеальних газів зв'язок між питомими ізобарною та ізохорною теплоємностями  $c_p$  і  $c_v$  встановлюється рівнянням Маєра:

$$c_p - c_v = R \quad (2.8)$$

і для мольних теплоємкостей:

$$\mu c_p - \mu c_v = R_\mu \quad (2.9)$$

## 2.2 Схема і опис лабораторної установки

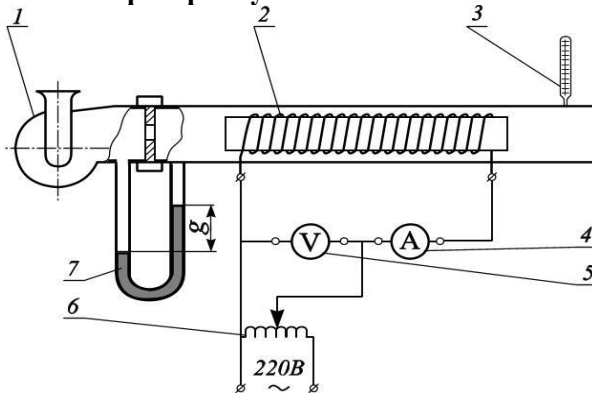


Рис. 2.1. Схема лабораторної установки.

Двошвидкісний вентилятор 1 подає з навколишнього середовища повітря. Його об'ємна продуктивність  $V$  при атмосферному тиску визначається витратоміром 7. Повітря нагрівають електронагрівником 2 при атмосферному тиску. Потужність тепла рівна електричній енергії, споживаній нагрівачем 2, і визначається за показами вольтметра 5 та амперметра 4. Температуру повітря на виході з установки вимірюють термометром 3.

Установка для визначення ізобарної теплоємкості повітря складається з вентилятора 1, нагрівача 2, термометра 3, амперметра 4, вольтметра 5, автотрансформатора 6 та витратоміра 7.

## 2.3 Порядок виконання роботи

3.1. Виміряти і записати величину атмосферного тиску  $P_0$  та температури  $t_1$ .

3.2. Включити вентилятор, а потім нагрівач установки. Встановити задану викладачем **потужність нагрівника** (виконує учбовий майстер).

3.3. Після стабілізації температури повітря, яке нагрівається, необхідно зняти покази вольтметра, амперметра, витратоміра та термометра:  $U, I, g, t_2$ .

3.4. Встановити *новий режим роботи установки* (виконує учбовий майстер) і повторити заміри за пунктом 3.3.

3.5. Виключити установку (виконує учбовий майстер).

#### 4. Обробка результатів дослідів

4.1. Потужність тепла підведеного до повітря, Вт

$$Q = U \cdot I \quad (2.10)$$

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

$$Q =$$

4.2. Об'ємну витрату повітря через калорифер, м<sup>3</sup>/с, визначають за формулою

$$V = 0,008085 \cdot \sqrt[3]{\Delta g} ; \quad (2.11)$$

$$\Delta g = g_1 - g_2 \text{ м, } g_1 = \text{_____ м, } g_2 = \text{_____ м.}$$

$$\Delta g =$$

$$V =$$

$g_1, g_2$  - рівні рідини у трубі витратоміра.

4.3. Користуючись рівнянням стану для довільної маси ідеального газу визначити масову продуктивність вентилятора, тобто масову витрату повітря через нагрівач:  $m$ , кг/с

$$m = \frac{P_6 \cdot V}{R \cdot T_2} , \quad (2.12)$$

$R$  – питома газова стала, (для повітря  $R = \frac{R_{\mu}}{\mu} = \frac{8314}{29} = 286.7$ ), Дж/К  $P_6$

– барометричний тиск повітря, Па,  $T$  – абсолютна температура повітря.

$$T_2 = t_2 + 273$$

$$P_6 = \frac{\cdot 101325}{760} = \quad \text{Па;}$$

$$m =$$

4.4. За формулою (2.1), знайти середню масову ізобарну теплоємність повітря,  $\frac{\hat{e} \Delta \hat{x}}{\hat{e} \hat{a} \cdot \hat{E}}$ ,

$$c_{pm} = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta t} =$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 =$$

4.5. Звести об'ємну продуктивність вентилятора до нормальних термодинамічних умов за формулою (2.3)

$$V_0 = \frac{T_0 \cdot P_6 \cdot V}{T_2 \cdot P_0} =$$

4.6. За формулою (2.2) розрахувати середню об'ємну ізобарну теплоємності повітря,  $\frac{\kappa Дж}{м^3 \cdot К}$ .

$$c'_{pm} = \frac{\Delta Q}{V_0 \cdot \Delta t} =$$

4.7. Використовуючи співвідношення (2.5) визначити подачу вентилятори у кмоль/с

$$v = \frac{V_0}{22,4} =$$

4.8. За формулою (2.4) розрахувати середню мольну ізобарну теплоємності повітря,  $\frac{\hat{e} \Delta \hat{e}}{\hat{e} \hat{e} \hat{e} \hat{e} \cdot \hat{E}}$

$$\mu c_{pm} = \frac{\Delta Q}{v \cdot \Delta t} =$$

4.9. Визначити мольну, масову та об'ємну ізобарні теплоємності **що відповідають ідеальному газу**.

Для цього використовуємо дані табл. 2.1 для **двоатомних** газів.

$$\mu c_{pm} = \frac{\kappa Дж}{кмоль \cdot К},$$

Скориставшись формулами зв'язку між теплоємностями (2.6), (2.7), визначити масову та об'ємну теплоємності

$$c_{pm} = \frac{\kappa Дж}{кг \cdot К};$$

$$c'_{pm} = \frac{\kappa Дж}{м^3 \cdot К}.$$

4.10. Визначити масову, об'ємну та мольну ізобарні теплоємності, прийнявши *лінійну* залежність теплоємності від температури

$$c_{lpm} = 0,9956 + 0,00009299 \cdot t, \quad (2.13)$$

$$c'_{lpm} = 1,2866 + 0,0001201 \cdot t, \quad (2.14)$$

$$\mu c_{lpm} = 28,8226 + 0,00269206 \cdot t, \quad (2.15)$$

$$t = 1/2 \cdot (t_1 + t_2) =$$

$$C_{lpm} = \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$C'_{lpm} = \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}};$$

$$\mu c_{lpm} = \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

4.11. Знайти розбіжність між дослідними та табличними (сталими) теплоємностями:

$$\delta_{c_x} = \frac{c_{x \text{ таб}} - c_{x \text{ дос}}}{c_{x \text{ таб}}} \cdot 100\%,$$

(2.18)

$c_{x \text{ таб}}$  – теплоємність визначена по таблицях;  $c_{x \text{ дос}}$  – теплоємність визначена дослідним шляхом;  $x$  – змінний індекс, котрий ідентифікує вид теплоємності.

4.12. Розбіжності між дослідними та табличними (сталими) теплоємностями:

$$\delta c_{pm} =$$

$$\delta c'_{pm} =$$

$$\delta \mu c_{pm} =$$

4.13. Розбіжності між дослідними та табличними (лінійними) теплоємностями:

$$\delta c_{lpm} =$$

$$\delta c'_{lpm} =$$

$$\delta \mu c_{lpm} =$$

**Таблиця 2.2**

Дані дослідів за п. 4.6 -4.8.

	$P_0$ мм. рт.ст.	$t_0$ С	$t_2$ С	$I$ , А	$U$ , В	$V$ , м <sup>3</sup> /с	$m$ , кг/с	$V_0$ , м <sup>3</sup> /с	$v$ , км/с	$C_{тр}$ , кДж/ (кг·К)	$C_{тр}$ , кДж/ (м <sup>3</sup> ·К)	$\mu C_{тр}$ , Дж/(км·К)

**Таблиця 2.3.**

Дані розрахунків за п. 4.10 – 4.13.

$c_{lpm}$	$c'_{lpm}$	$\mu c_{lpm}$	$\delta c_{lpm}$	$\delta c'_{lpm}$	$\delta \mu c_{lpm}$	$\delta c_{pm}$	$\delta c'_{pm}$	$\delta \mu c_{pm}$

4.14 Зробити аналіз отриманих результатів та записати висновки.

### Висновки:

1.

2.

### 5. Контрольні питання

5.1. Що таке теплоємність (мольна, масова, об'ємна)?

5.2. Види теплоємності та зв'язок між ними?

5.3. Істинна та середня теплоємність?

5.4. Ізобарна та ізохорні теплоємність та зв'язок між ними?

5.5. Залежність теплоємності від температури?

5.6. Формула знаходження теплоти через масу, об'єм та кількість мо-  
лів при  $P = \text{const}$  та  $v = \text{const}$ ?

5.7. Що таке робота, теплота, ентальпія та внутрішня енергія?

### Література

1. Приходько М.А., Герасимов Г.Г. Термодинаміка та теплопере-  
дача. Рівне, 2008, - 250 с.



2. Чепурний М.М., Ткаченко С.Й. Основи технічної термодинаміки. Вінниця, 2004, - 351с.

3. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. – Підруч. для студ. енерг. спец. вищ. навч. закл. – Київ: Техніка, 2006. – 320 с.

4. Алабовский А.Н., Недужий И.А. Техническая термодинамика и теплопередача. Киев: Высшая школа, 1990.-255 с.

### Лабораторна робота № 3

**Тема:** Термодинамічні процеси в газах

**Мета роботи:** Дослідити термодинамічний процес, наближений до адіабатного, визначити показник адіабати для повітря.

#### 3.1 Загальні положення

У будь-якому термодинамічному процесі зв'язок між початковими та кінцевими параметрами робочого тіла (ідеального газу) знаходяться за об'єднаним газовим законом,

$$\frac{P_1 \cdot v_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot v_2}{T_2}, \quad (3.1)$$

$v_1, v_2$  – питомий об'єм на початку і в кінці процесу, м<sup>3</sup>/кг,  $P_1, P_2$  - абсолютний тиск газу на початку і в кінці процесу, Па,  $T_1, T_2$  - абсолютна температура на початку і в кінці процесу, К.

Одним з досить поширених процесів є **адіабатний – процес що відбувається без теплообміну робочого тіла з навколишнім середовищем.**

На практиці забезпечити повністю адіабатний процес майже не можливо, оскільки відсутні ідеальні теплоізолятори. Деколи можна наблизитися до адіабатного процесу дуже швидко стискаючи, або розширюючи газ, маючи на увазі, що за час процесу теплообмін не встигає відбутися. Для адіабатного процесу з ідеальним газом зв'язок між будь-якою парою параметрів початкового та кінцевого стану визначається співвідношеннями:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k, \quad (3.2); \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}, \quad (3.3) \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (3.4)$$

$k$  – показник адіабати, для даного типу газу стала величина.

### 3.2 Схема та опис лабораторної установки

Схема та короткий опис лабораторної установки показані в описі лабораторної роботи № 1.

### 3.3 Порядок виконання роботи

3.1. Накачати компресором повітря у балон, щоб тиск був 5-7 бар (виконує учбовий майстер).

3.2. Зачекати 1-1,5 хвилини доки стабілізується температура та тиск повітря у балоні.

3.3. Виміряти температуру  $t_1$ , надлишковий тиск повітря в балоні  $P_1$ , записати покази ваги  $G_1$ .

3.4. Включити та миттєво виключити електромагнітний клапан, забезпечивши миттєве розширення газу.

3.5. Записати покази ваги  $G_2$  і мінімальне значення тиску повітря у балоні  $P_2$  після спрацьовування клапана, використавши манометр.

3.6. Повторити дослід, ще три рази, виконавши пункти 3.2 - 3.5.

3.7. Записати величину атмосферного тиску  $P_0$ .

3.8. Данні досліду занести в таблицю 3.1.

**Таблиця 3.1**

Дослідні та розрахункові дані

№ дос- лідів	№ стану	$P_0$ , мм.рт.ст.	$P_{над}$ , ат	$t_1$ , °C	$P_{абс}$ , Па	$m$ , кг	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$T$ , К	$k$	$\delta$ , %
1	1		5.10	15						
	2		2.71							
2	1		3.20	15						
	2		1.59							
3	1		1.93	15						
	2		0.13							
4	1		0.45	15						
	2									
		Середнє								

### 3.4 Обробка результатів дослідів

4.1. Перевести всі значення тиску в Па.

$$P_{\sigma} = \frac{\cdot 101325}{760} = \text{Па};$$

$$P_{\text{над}}^{1.1} = \cdot 98100 = \text{Па};$$

$$P_{\text{над}}^{1.2} = \cdot 98100 = \text{Па};$$

$$P_{\text{над}}^{2.1} = \cdot 98100 = \text{Па};$$

$$P_{\text{над}}^{2.2} = \cdot 98100 = \text{Па};$$

$$P_{\text{над}}^{3.1} = \cdot 98100 = \text{Па};$$

$$P_{\text{над}}^{3.2} = \cdot 98100 = \text{Па};$$

$$P_{\text{д\`а}}^{4.1} = \cdot 98100 = \text{Па};$$

$$P_{\text{д\`а}}^{4.2} = \cdot 98100 = \text{Па}.$$

4.2. Для кожного стану повітря в балоні знайти величину абсолютного тиску за формулою:

$$P_{\text{д\`а}}^{\text{д\`а}} = D_{\text{д\`а}} + D_{\text{д\`а}}^{\text{xy}}, \quad (3.5)$$

x = 1...3 – номер досліду, y = 1...2 – номер стану.

$$D_{\text{д\`а}}^{1.1} =$$

$$D_{\text{д\`а}}^{1.2} =$$

$$D_{\text{д\`а}}^{2.1} =$$

$$D_{\text{д\`а}}^{2.2} =$$

$$D_{\text{д\`а}}^{3.1} =$$

$$D_{\text{д\`а}}^{3.2} =$$

$$P_{\text{air}}^{4.1} =$$

$$P_{\text{air}}^{4.2} =$$

4.3. Використовуючи рівняння для довільної маси ідеального газу, знайти масу повітря в балоні у першому стані  $m_1$ :

$$m_{\text{air},1} = \frac{P_{\text{air},1} \cdot V}{R \cdot T_{\text{air},1}}, \text{ кг}, \quad (3.6)$$

$V = 0,04 \text{ м}^3$  – об'єм балона,  $R$  – питома газова стала, (для повітря

$$R = \frac{R_{\text{univ}}}{\mu} = 286.7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}).$$

$$m_{1,1} = \frac{P_{\text{air},1,1} \cdot V}{R \cdot T_{1,1}} =$$

$$m_{2,1} = \frac{P_{\text{air},2,1} \cdot V}{R \cdot T_{2,1}} =$$

$$m_{3,1} = \frac{P_{\text{air},3,1} \cdot V}{R \cdot T_{3,1}} =$$

$$m_{4,1} = \frac{P_{\text{air},4,1} \cdot V}{R \cdot T_{4,1}} =$$

4.4. Знаючи масу газу  $m_1$  і об'єм балона  $V$  розрахувати питомий об'єм повітря у першому стані,  $\text{м}^3/\text{кг}$

$$v_{x,1} = \frac{V}{m_{x,1}}, \quad (3.6a)$$

$$v_{1,1} = \frac{V}{m_{1,1}} =$$

$$v_{2,1} = \frac{V}{m_{2,1}} =$$

$$v_{3,1} = \frac{V}{m_{3,1}} =$$

$$v_{4.1} = \frac{V}{m_{4.1}} =$$

4.5. Визначити масу повітря, яке залишилось у балоні після спрацювання електромагнітного клапана, кг. Ця величина визначається за розрахунком, див. п. 4.3, формула (3.6)  $m_{21}$ ,  $m_{31}$ ,  $m_{41}$ .

4.6. Використовуючи рівняння (2.2), визначити величину показника адиабати  $k$  для повітря за відомими значеннями  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $v_1$ ,  $v_2$ .

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k \Rightarrow \ln \frac{P_2}{P_1} = k \cdot \ln \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow k = \frac{\ln \frac{P_2}{P_1}}{\ln \frac{v_1}{v_2}} \quad (3.7)$$

$$k_1 = \frac{\ln \frac{P_{1.2}}{P_{1.1}}}{\ln \frac{v_{1.1}}{v_{2.1}}}$$

$$k_2 = \frac{\ln \frac{P_{2.2}}{P_{2.1}}}{\ln \frac{v_{2.1}}{v_{3.1}}}$$

$$k_3 = \frac{\ln \frac{P_{3.2}}{P_{3.1}}}{\ln \frac{v_{3.1}}{v_{4.1}}}$$

4.7. Розрахувати середнє арифметичне значення показника адиабати:

$$k_{\text{ср}} = \frac{\sum_{x=1}^3 k_x}{3} =$$

4.8. Визначити похибку, яка була допущена в кожному досліді:

$$\delta_x = \frac{k_{cp} - k_x}{k_{cp}} \cdot 100\% \quad (3.8)$$

$$\delta_I = \frac{k_{cp} - k_I}{k_{cp}} \cdot 100\% =$$

$$\delta_2 = \frac{k_{cp} - k_2}{k_{cp}} \cdot 100\% =$$

$$\delta_3 = \frac{k_{cp} - k_3}{k_{cp}} \cdot 100\% =$$

4.9. Результати розрахунків записати у таблицю 3.1. За результатами роботи зробити висновок.

### **Висновки:**

- 1.
- 2.

### **3.5 Контрольні питання**

5.1. Перерахувати основні термодинамічні процеси і пояснити їх фізичну суть.

5.2. Використовуючи (3.1), записати рівняння для ізохорного, ізобарного та ізотермічного процесів. Записати формули для визначення роботи у цих процесах.

5.3. Зобразити основні процеси на P-V діаграмі та пояснити графічне зображення роботи для них.

5.4. Записати формули зв'язку між термодинамічними параметрами робочого тіла в адіабатному процесі.

5.5. Записати і пояснити формули для зміни внутрішньої енергії, ентальпії та кількості теплоти в основних термодинамічних процесах.

### **Література**

1. Приходько М.А., Герасимов Г.Г. Термодинаміка та теплопередача. Рівне, 2008, - 250 ст.

2. Алабовский А.Н., Недужий И.А. Техническая термодинамика и теплопередача. Киев: Высшая школа, 1990.-255 с.
3. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. – Підруч. для студ. енерг. спец. вищ. навч. закл. – Київ: Техніка, 2006. – 320 с.
4. Константинов М.С. Теплообмін: Підручник. – Київ: ВПН ВПК „Політехніка”: Інрес, 2005. – 304 с.

## Лабораторна робота № 4

**Тема:** Вивчення термодинамічних властивостей вологого повітря

**Мета роботи:** Дослідження процесів з вологим повітрям

### 4.1 Основні характеристики вологого повітря

*Суміш сухого повітря та водяної пари називається вологим повітрям. Вологе повітря, котре містить максимально можливу при даній температурі кількість водяної пари, називається насиченим.*

*Повітря котре містить перегріту водяну пару, є ненасиченим.*

Тиск вологого повітря визначають за законом Дальтона

$$P = P_n + P_v, \quad (4.1)$$

$P_n$ ,  $P_v$  - парціальний тиск сухого повітря та водяної пари,  $P_a$ .

*Абсолютна вологість – кількість водяної пари, що міститься в одному м<sup>3</sup> вологого повітря, вона рівна щільності (густині) пари при її парціальному тискові та температурі повітря,  $\rho_n$ , [кг/м<sup>3</sup>].*

*Відносна вологість – відношення абсолютної вологості ненасиченого повітря при даній температурі до абсолютної вологості насиченого повітря при тій же температурі:*

$$\varphi = \frac{\rho_0}{\rho_n}. \quad (4.2)$$

**Вологовміст**  $d$  [г/кг<sub>сухого повітря</sub>] – маса водяної пари, віднесена до 1 кг сухого повітря

$$d = \frac{m_n}{m_{cn}}. \quad (4.3)$$

Крім того для характеристики стану вологого повітря використовують: температуру *мокрого*  $t_m$  та *сухого термометра*  $t$ ; температуру

точки роси  $t_p$  - температуру, до якої потрібно охолодити вологе повітря, щоб у ньому перегріта водяна пара стала насиченою.

Ентальпію  $h$ , [кДж/кг·К], визначають як суму ентальпії 1кг сухого повітря і 1кг водяної пари:

$$h = h_{c.n} + h_{en} \cdot d = c_p \cdot t + h_{en} \cdot d. \quad (4.4)$$

Приймаючи, що сухе повітря і водяна пара – ідеальні гази маємо,

$$h = 1,0048 \cdot t + (2500 + 1,96 \cdot t) \cdot d. \quad (4.5)$$

Формула (6.5) стосується 1кг сухого повітря.

#### 4.2 $h - d$ - діаграма волого повітря

На  $h-d$  діаграмі, див. рис. 4.1, відображені основні параметри вологого повітря. При нормальному тискові (98,1кПа) під кутом  $135^\circ$  до осі ординат **проведені лінії сталої ентальпії  $h = Const$ , кДж/кг сухого повітря**, на осі абсцис - **значення вологовмісту  $d$ , г/кг сухого повітря**. Лінія  $\varphi = 100\%$  (що відповідає насиченому повітрю) поділяє діаграму на **робочу та не робочу частини**.



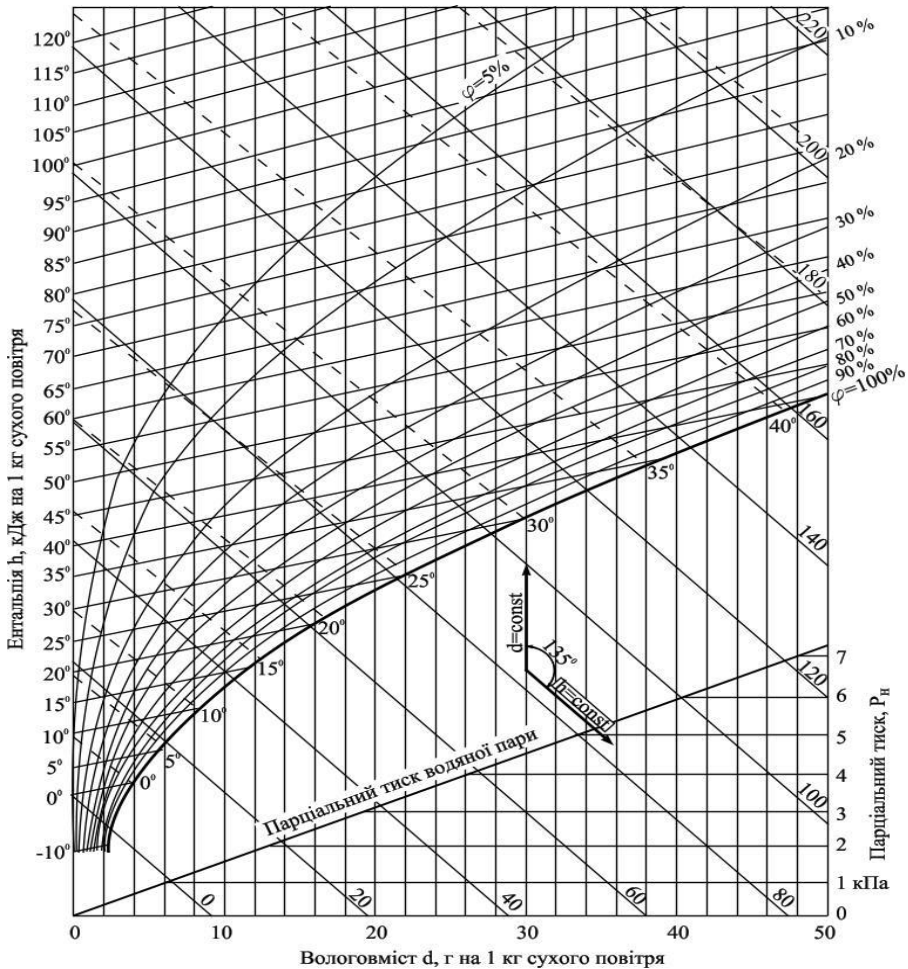


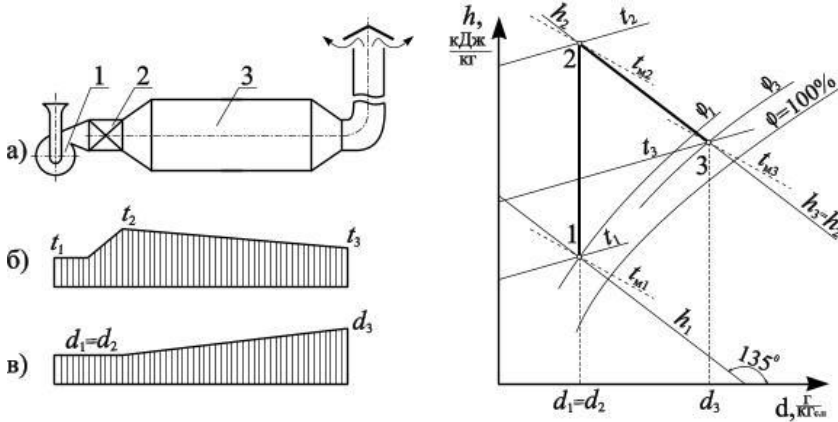
Рис. 4.1.  $h$ - $d$  діаграма вологого повітря.

На робочій частині наносять криві *постійної відносної вологості*  $\varphi = const$ , *ізотерми сухого термометра* (прямі лінії під гострим кутом до осі абсцис) і *мокрого термометра*  $t_m = const$  (штриховані лінії). На неробочій частині діаграми проведена лінія *парціального тиску пари та шкала значень парціального тиску водяної пари* (у правому нижньому куті). *Кожна точка на  $h$ - $d$  - діаграмі визначає* параметри  $h$ ,  $t$ ,  $t_m$ ,  $d$ ,  $\varphi$ . Крім того провівши вертикальну лінію до лінії насиченого повітря,

знайдемо температуру *точки роси*  $t_p$ , а до лінії парціального тиску та вправо від неї знайдемо *парціальний тиск водяної пари*  $P_w$ . Для визначення положення точки на  $h$ - $d$  діаграмі, достатньо знати два будь яких параметри зі згаданих.

### 4.3 Процес сушки

**Видалення вологи з матеріалу** завдяки передачі йому тепла називається *процесом сушки*. Пристрій у якому відбувається процес сушки називається **сушаркою**. Сушарка, де теплота передається конвекцією, на-



зивається **конвективною**.

**Рис.4.2.** Принципова схема установки та  $h$ - $s$  діаграма процесу сушки.

Вона складається з вентилятора 1, калорифера 2, сушильної камери 3.

*Теоретичним (ідеальним) процесом сушки називається процес, де не має втрат тепла на нагрівання матеріалу та в оточення.*

У теоретичному процесі прийнято, що *все тепло затрачається на випаровування води з матеріалу*. Такий процес складається з нагрівання повітря (лінія 1-2 на діаграмі) при  $d = const$  у калорифері.

Після чого це повітря подається у сушильну камеру, де відбувається *адіабатне випаровування вологи з матеріалу* (зволоження повітря), процес 2-3 відбувається при  $h = const$ . Вологе повітря в калорифері отримує теплоту

$$q = h_2 - h_1,$$

а кількість випареної вологи на 1 кг сухого повітря

$$\Delta d = d_3 - d_1.$$

Для випаровування 1 кг вологи потрібно сухого повітря

$$l = 1000/\Delta d, [\text{кг}_{\text{сух пов}}],$$

тисяча в чисельнику появилася завдяки перетворенню  $d$  [кг/г] в [кг/кг<sub>сух пов</sub>].

#### 4.4 Схема лабораторної установки

Схема лабораторної установки зображена на рис. 2.1 опису лабораторної роботи 2.

Установка для сушки дослідних зразків (кусточків тканини) складається з вентилятора 1, нагрівача 2, термометра 3, ротаметра 4, мокрого 5 та сухого 6 термометрів, сушильної камери 7, рамки та дослідних зразків 8, амперметра 9, вольтметра 10, латра 11, витратоміра 12.

Двошвидкісний вентилятор 1 подає зовнішнє повітря. Його об'ємну продуктивність  $V_{\text{пов}}$  при атмосферному тискові визначаємо витратоміром 12. Повітря нагрівають електричним нагрівачем 2 при атмосферному тискові. Кількість тепла, що отримує повітря, чисельно рівна підведеної електричній енергії, яку споживає нагрівач 2 і визначається за показами амперметра 9 та вольтметра 10. Температуру повітря на виході з нагрівача вимірюють термометром 3. Нагріте повітря проходить через сушильну камеру 7, у якій в рамці 8 розміщені дослідні зразки. Дослідні зразки зволожують, вимірюючи витрату води для зволоження ротаметром 4. На виході з 7 параметри відпрацьованого повітря фіксують мокрим 5 та сухим 6 термометрами.

#### 4.5 Порядок виконання роботи

5.1. Визначити відносну вологість (психометром або на  $h-d$  діаграмі за показами сухого та мокрого термометра) та барометричний тиск повітря, що подається у калорифер.

5.2. Зволожити дослідні зразки (кусточки тканини) і розмістити їх у сушильній камері.

5.3. За допомогою ротаметра відрегулювати систему зволоження дослідного зразка (2 - 4 каплі за хвилину).

5.4. Включити установку і автотрансформатором *установити температуру повітря на вході у сушильну камеру (60 - 100 °C)*.

5.5. Після стабілізації сушки (температури за термометрами сталі) зняти покази приладів (температури сухого і мокрого термометрів  $t_1$  та  $t_{1м}$  для зовнішнього повітря, на вході в сушильну камеру  $t_2$  і виході з неї  $t_3$  і  $t_{3м}$ , покази амперметра  $I$ , вольтметра  $U$ , витратоміра  $g$ ).

5.6. Повторити процедуру зняття показів приладів через кожні 2 -3 хв. всього 3 - 6 разів.

5.7. Отримані результати дослідів занести у таблицю 4.1.

**Таблиця 4.1.**  
Дослідні дані

N	$P_{бар}$ мм.рт. ст.	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_{м1}, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$I, \text{В}$	$U, \text{А}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$t_{м3}, ^\circ\text{C}$	$g_1, \text{м}$	$g_2, \text{м}$
1										
2										
...										
Сер										

#### 4.6 Обробка результатів вимірювань

6.1. Витрата повітря на вході у калорифер,  $\text{м}^3/\text{с}$ , розраховують за формулою

$$V = 0,00578 \cdot \sqrt[3]{\Delta g}, \Delta g = g_1 - g_2, \text{ м.} \quad (4.6)$$

$$\Delta g = \quad V =$$

6.2. Кількість тепла, затраченого на нагрівання повітря в калорифері, приймаємо рівною потужності нагрівача, Вт,

$$Q_{зат} = P = U \cdot I, \text{ Вт.} \quad (4.7)$$

$$Q_{зат} =$$

6.3. За таблицею 4.1 знаходимо середні величини показів приладів.

6.4. На  $h-d$  діаграмі стану вологого повітря за даними показів сухого та вологого термометрів знаходимо ентальпії та вологовмісти для точок 1, 2, 3, див. рис. 4.2 реального процесу сушки.

$$\text{Точка 1 } d_1 = \quad \text{г/кг}_{\text{сух.пов.}}; \quad h_1 = \quad \text{кДж/кг}_{\text{сух.пов.}}; \quad \varphi_1 = \quad \%. \quad$$

Точка 2  $d_2 =$   $г/кг_{сух.нов.}$ ;  $h_2 =$   $кДж/кг_{сух.нов.}$ ;  $\varphi_2 =$  %.

Точка 3  $d_3 =$   $г/кг_{сух.нов.}$ ;  $h_3 =$   $кДж/кг_{сух.нов.}$ ;  $\varphi_3 =$  %.

6.5. Визначаємо масову витрату сухого повітря,  $кг_{сух.пов.}/с$

$$M_{c.n.} = \frac{P_{c.n.} \cdot V_{нов.}}{R_{c.n.} \cdot T_1}, \quad (4.8)$$

$R_{c.n.}$  - газова стала сухого повітря,  $R_{c.n.} = 286,8$  Дж/кг·К;  $T_1$  – абсолютна температура повітря, К;  $P_{c.n.}$  - парціальний тиск сухого повітря,

$$P_{c.n.} = P_{нов.} - P_n, \quad (4.9)$$

$P_n$  - парціальний тиск сухої насиченої пари, Па, знаходимо за  $h-d$  діаграмою стану вологого повітря, або з залежності:

$$d = \frac{622 \cdot P_n}{P_{нов.} - P_n}, \quad (4.10)$$

$$P_n = \frac{d \cdot P_{нов.}}{622 + d} = \quad P_{нов.} = \frac{P_{\delta} \cdot 101325}{760} =$$

$$P_{c.n.} = \quad M_{c.n.} =$$

6.6. Визначаємо кількість випареної вологи на 1кг сухого повітря в процесі сушки, г/кг,

$$\Delta d = d_3 - d_1 =$$

6.7. Визначаємо кількість сухого повітря, затраченого на випаровування 1 кг вологи, кг

$$l = \frac{1000}{\Delta d}, \quad (4.11)$$

$$l =$$

6.8. Визначаємо кількість тепла на 1кг сухого повітря, переданого нагрівачем повітрю, за винятком витрат у калорифері і сушильній камері,  $кДж/кг_{сух.нов.}$ ,

$$q = h_3 - h_1, \quad (4.12)$$

$$q =$$

6.9. Визначаємо кількість випареної вологи,  $кг/с$ ,

$$M_B = \frac{M_{c.n.}}{l}, \quad (4.13)$$

$$M_B =$$

6.10. Визначаємо кількість тепла отриманого повітрям в калорифері, Вт,

$$Q_{отр} = M_{c.n.} \cdot q, \quad (4.14)$$

$$Q_{отр} =$$

6.11. Визначаємо втрати тепла у калорифері, Вт,

$$\Delta Q_{кал} = Q_{зат} - Q_{отр}, \quad (4.15)$$

$$\Delta Q_{кал} =$$

6.12. Визначаємо витрату тепла у сушильній камері, Вт,

$$\Delta Q_{кам} = M_{c.n.} \cdot (h_3 - h_1), \quad (4.16)$$

$$\Delta Q_{кам} =$$

6.13. Визначаємо загальну витрату тепла, Вт,

$$Q = Q_{\hat{a}\hat{a}} + Q_{\hat{a}\hat{i}}, \quad (4.17)$$

$$Q =$$

6.14. Визначаємо кількість тепла витраченого на 1кг випареної вологи,  $\text{Дж}/\text{кг}_{\text{вол}}$ ,

$$\Delta q = q \cdot l = \quad (4.18)$$

6.15. За  $h - d$  діаграмою стану вологого повітря знаходимо ентальпії та вологовмісти точок 1', 2', 3' для **теоретичного** (ізоентальпійного) процесу сушки, див. рис. 4.2.

$$\text{Точка 1'} \quad d_1' = \quad \text{г}/\text{кг}_{\text{сух.пов}}; \quad h_1' = \quad \text{кДж}/\text{кг}_{\text{сух.пов}}; \quad \varphi_1' = \quad \%$$

$$\text{Точка 2'} \quad d_2' = \quad \text{г}/\text{кг}_{\text{сух.пов}}; \quad h_2' = \quad \text{кДж}/\text{кг}_{\text{сух.пов}}; \quad \varphi_2' = \quad \%$$

$$\text{Точка 3'} \quad d_3' = \quad \text{г}/\text{кг}_{\text{сух.пов}}; \quad h_3' = \quad \text{кДж}/\text{кг}_{\text{сух.пов}}; \quad \varphi_3' = \quad \%$$

6.16. Визначаємо кількість випареної вологи на 1кг сухого повітря в процесі сушки, г/кг,

$$\Delta d' = d'_3 - d'_1 =$$

6.17. Визначаємо кількість сухого повітря, затраченого на випаровування 1кг вологи, кг,

$$l' = \frac{1000}{\Delta d'}, \quad (4.19)$$

$$l' =$$

6.18. Визначаємо кількість тепла на 1кг сухого повітря, переданого нагрівачем повітря, за винятком витрат у калорифері і сушильній камері, кДж/кг<sub>сух.пов.</sub>,

$$q' = h'_3 - h'_1, \quad (4.20)$$

$$q' =$$

6.19. Визначаємо кількість випаруваної вологи, кг/с,

$$M'_B = \frac{M_{c.n}}{l'}, \quad (4.21)$$

$$M'_B =$$

6.20. Визначаємо кількість тепла, отриманого повітрям у калорифері, Вт,

$$Q'_{отр} = M_{c.n} \cdot q', \quad (4.22)$$

$$Q'_{отр} =$$

6.21. Визначаємо втрати тепла у калорифері, Вт,

$$\Delta Q'_{кал} = Q_{зат} - Q'_{отр}, \quad (4.23)$$

$$\Delta Q'_{кал} =$$

6.22. Визначаємо витрату тепла у сушильній камері, Вт,

$$\Delta Q'_{кам} = M_{c.n} \cdot (h'_3 - h'_1), \quad (4.24)$$

$$\Delta Q'_{кам} =$$

6.23. Визначаємо загальні витрати тепла, Вт,

$$\Delta Q' = Q'_{кал} + Q'_{кам}, \quad (4.25)$$

$$\Delta Q' =$$

6.24. Визначаємо кількість тепла витраченого на 1кг випаруваної вологи,  $\text{Дж/кг}_{\text{вол}}$ ,

$$\Delta q' = q' \cdot l' = \quad (4.26)$$

6.25. Отримані результати звести у таблицю 6.2.

6.26. Порівняти теоретичний та реальний процеси сушки та зробити висновок.

Таблиця 6.2  
Результати розрахункових даних

Параметри	$Q_{\text{зат}}$ , Вт	$l$ , кг/кг <sub>сух.пов</sub>	$\Delta q$ , кДж/кг	$\Delta Q_{\text{кал}}$ , Вт	$\Delta Q_{\text{кам}}$ , Вт	$\Delta Q_{\text{кам}}$ , Вт	$M_B$ , кг/с
Реальні							
Теоретичні							

## Висновки

- 1.
- 2.
- 3.

## 7 Контрольні питання

7.1. Що таке насичене і ненасичене вологе повітря.

7.2. Перерахуйте та поясніть зміст параметрів, які характеризують стан вологого повітря.

7.3. Яким чином з даної точки "р-ν" діаграми, що відповідає ненасиченому вологому повітрю, можна досягнути стану максимального насичення та точки роси?

7.4. Які дані потрібні для визначення положення точки на  $h-d$  діаграмі?

7.5 Які інші параметри вологого повітря можна визначити за положенням точки на  $h-d$  діаграмі?



7.6. Поясніть основні процеси вологого повітря, зокрема процес сушки.

7.7. Проаналізуйте теоретичний та реальний процеси сушки на  $h - d$  діаграмі.

7.8. В чому полягає різниця між теоретичним (ідеальним) процесом сушки та його реальним перебігом?

7.9. Що дозволяють визначити (яким чином?) покази температур за сухим та вологим термометрами?

### Література

1. Приходько М.А., Герасимов Г.Г. Термодинаміка та теплопередача. Рівне, 2008, - 250 ст.
2. Алабовский А.Н., Недужий И.А. Техническая термодинамика и теплопередача. Киев: Высшая школа, 1990.-255 с.
3. Драганов Б.Х., Долінський А.А., Міщенко А.В., Письменний Є.М. і ін. Теплотехніка.- Київ: „ІНКОС”, 2005.- 504 с.
4. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. – Підруч. для студ. енерг. спец. вищ. навч. закл. – Київ: Техніка, 2006. – 320 с.
5. Константинов М.С. Теплообмін: Підручник. – Київ: ВПІ ВПК „Політехніка”: Інрес, 2005. – 304 с.

## Лабораторна робота № 5

**Тема:** Нагнітання пари та газів.

**Мета роботи:** Визначити показник політропи для процесу стиснення повітря у першому та другому ступенях компресора; розрахувати роботу, необхідну для приводу компресора при політропному, адіабатному та ізотермічному процесах стиснення; потужність необхідну для приводу компресора і порівняти її з дійсною споживаною потужністю.

### 5.1 Загальні відомості

*Нагнітання - сукупність процесів, внаслідок виконання яких досягається підвищення тиску газу перед його подачею споживачам.*

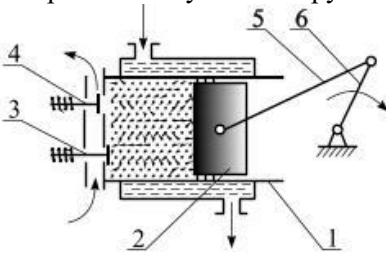
Для нагнітання пари та газів використовують машини, які називають *компресорами*. Найбільш розповсюдженими є *механічні компресори*.

За принципом дії компресори поділяються на *об'ємні* та *лопатеві*. В об'ємних компресорах підвищення тиску досягається зменшенням

об'єму газу внаслідок зближення стінок. Вони бувають *поршневими, шестерневими і ротаційними*.

У лопатевих компресорах стиснення відбувається за два етапи: спочатку газ в лопатевих каналах завдяки обертанню ротора прискорюється до великої швидкості, а далі, в спеціальних нерухомих каналах (дифузорах), кінетична енергія потоку перетворюється у потенціальну, тобто внаслідок зменшення швидкості підвищується тиск потоку. Лопатеві компресори бувають відцентровими та осьовими.

Схема поршневого компресора зображена на рис. 7.1. Компресор складається з циліндра 1, всередині якого рухається поршень 2, що здійснює зворотно-поступальний рух за допомогою колінчатого валу 6 і шатуна 5.



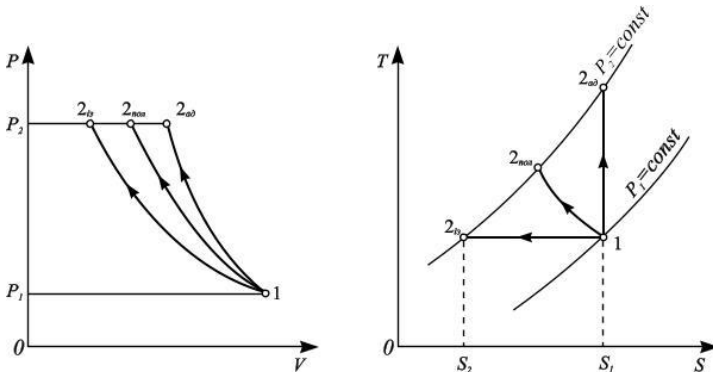
Крайні положення поршня називаються *мертвими точками*, а відстань між ними – *ходом поршня*. Стиснення може бути *ізотермічним, адіабатним та політропним*.

**Рис. 5.1.** Спрощена

схема поршневого компресора.

При ізотермічному стисненні необхідно *постійно відводити тепло* від робочого тіла, що досягається охолодженням зовнішніх стінок компресора. При адіабатному стисненні теплообмін робочого тіла зі стінками циліндра відсутній, вони повинні бути теплоізованими. Політропне стиснення характеризується сталою теплоємністю робочого тіла в процесі і показником політропи.

Робочий процес компресора зображений в  $P-v$  та  $T-s$  діаграмах на рис. 7.2. Відповідні процеси на цих діаграмах зображені лініями:  $1-2_{iz}$  – ізотермічне стиснення;  $1-2_{ad}$  – адіабатне стиснення;  $1-2_{пол}$  – політропне стиснення.



**Рис. 5.2.** Робочий процес компресора зображений в  $P$ - $v$  та  $T$ - $s$  діаграмах.

При всмоктуванні газ розширюється, тобто виконує додатну роботу. Якщо при цьому поршень з площею  $F$  перемістився на відстань  $S_1$ , то робота газу рівна:

$$p_1 \cdot V_1 = p_1 \cdot F \cdot S_1. \quad (5.1)$$

Для 1кг газу ця робота становить  $p_1 \cdot v_1$ , де,  $v_1$  - питомий об'єм газу в процесі всмоктування. При стисненні газу по лінії 1 – 2 робота яку він виконує рівна:

$$l_{1-2} = \int_1^2 p(v) \cdot dv. \quad (5.2)$$

При виштовхуванні газу з циліндра (газ при цьому стискується) робота яку він виконує рівна –  $p_2 \cdot v_2$ . Тоді загальна робота, яку виконує газ є сума цих трьох складових

$$l_n = p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2 + l_{1-2}. \quad (5.3)$$

Робота компресора має протилежний знак. Тоді рівняння (5.3) перетворене до роботи компресора має вигляд:

$$l_{\text{г}} = -p_1 \cdot v_1 + p_2 \cdot v_2 - \int_1^2 p \cdot dv. \quad (5.4)$$

При **ізотермічному** стисненні ідеального газу  $p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2$ , тоді рівняння для визначення питомої роботи нагнітання приймає вид

$$l_i = - \int_1^{2^{\frac{3\zeta}{2}}} p \cdot dv = -R \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2^{\frac{3\zeta}{2}}} = R \cdot T \cdot \ln \frac{\delta_2^{3\zeta}}{\delta_1} \quad (5.5)$$

При **адіабатному** стисненні ідеального газу робота нагнітання,

$$\int_1^{2^{\frac{\Delta\ddot{a}}{I}}} p \cdot dv = \frac{I}{k-1} (p_1 \cdot v_1 - p_2^{\frac{\Delta\ddot{a}}{I}} \cdot v_2^{\frac{\Delta\ddot{a}}{I}})$$

і рівняння для визначення питомої роботи запишеться:

$$l_n^{a\delta} = -p_1 \cdot v_1 + p_2^{a\delta} \cdot v_2^{a\delta} - \frac{I}{k-1} (p_1 \cdot v_1 - p_2^{a\delta} \cdot v_2^{a\delta}); \quad (5.6)$$

$$= (p_2^{a\delta} \cdot v_2^{a\delta} - p_1 \cdot v_1) \cdot \left( 1 + \frac{I}{k-1} \right)$$

$$l_i^{\Delta\ddot{a}} = \frac{k}{k-1} \cdot (p_2^{\Delta\ddot{a}} \cdot v_2^{\Delta\ddot{a}} - \delta_1 \cdot v_1) = \frac{k}{k-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2^{\Delta\ddot{a}}}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (5.7)$$

$k$  – показник адіабати.

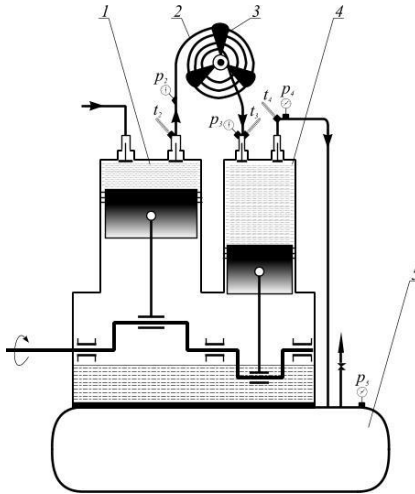
При **політропному** стисненні ідеального газу формула для визначення питомої роботи нагнітання подібна до (5.7)

$$l_i^{\ddot{e}} = \frac{n}{n-1} \cdot (p_2^{\ddot{e}} \cdot v_2^{\ddot{e}} - \delta_1 \cdot v_1) = \frac{n}{n-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2^{\ddot{e}}}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (5.8)$$

$n$  – показник політропи,  $\frac{P_2}{P_1} = \beta$  – ступінь підвищення тиску.

## 5.2 Схема та опис лабораторної установки

Двоступеневий компресор складається з компресора першого низького тиску - ступінь 1 і компресора високого тиску - другий ступінь 4, конструктивно об'єднаних між собою через проміжний холодильник 2. Повітря, стиснене у першому ступені, перед надходженням у другий охолоджується в проміжному холодильнику потоком зовнішнього повітря, який створюється вентилятором 3. Стиснене повітря подається у ресивер (ємність для стисненого повітря) 5.



**Рис. 5.3.** Схема двоступеневого компресора.

На компресорі встановлені термометри і манометри для визначення температури стисненого повітря  $t$  та надлишкового тиску  $P_{над}$ .

$t_2, P_{2над}$  - температура і надлишковий тиск повітря *після першого ступеня*;

$t_3, P_{3над}$  - температура та надлишковий тиск *після проміжного холодильника і на вході в другий ступінь*;

$t_4, P_{4над}$  - температура і тиск повітря *після другого ступеня*;

$P_{5над}$  - надлишковий тиск у ресивері.

Температура  $t_1$  і тиск атмосферного повітря  $P_1$  визначається термометром та барометром, що встановлені в лабораторії.

### 5.3 Порядок виконання роботи

Перед пуском компресора необхідно упевнитись у відсутності на ньому зайвих предметів. Перевірити наявність масла в картері компресора. Повернути маховик на 8-10 обертів. З дозволу викладача включити компресор і встановити заданий тиск у ресивері  $P_5$ . Через 10 хвилин після встановлення тиску  $P_5$  зняти показники термометрів, манометрів і занести їх у таблицю 7.1.

**Зауваження:** всі перелічені процедури виконує лаборант.

**Таблиця 5.1**  
Показання приладів

$P_6$	$P_{2 \text{ над}}$	$P_{3 \text{ над}}$	$P_{4 \text{ над}}$	$P_{5 \text{ над}}$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$
мм.рт.ст	кгс/см <sup>2</sup>				°C			

### 5.4 Обробка результатів дослідів

4.1. Перевести всі значення тиску в однакову розмірність, Па

$$P_6 = \frac{\cdot 101325}{760} = \text{Па};$$

$$P_{\text{над.2}} = \cdot 98100 = \text{Па};$$

$$P_{\text{над.3}} = \cdot 98100 = \text{Па};$$

$$P_{\text{над.4}} = \cdot 98100 = \text{Па};$$

$$P_{\text{над.5}} = \cdot 98100 = \text{Па};$$

4.2. Для кожного стану повітря в балоні знайти величину абсолютного тиску за формулою

$$P_{\text{абс.}i} = P_{\text{атм}} + P_{\text{над.}i}, \quad (5.9)$$

$$P_{\text{абс.2}} =$$

$$P_{\text{абс.3}} =$$

$$P_{\text{абс.4}} =$$

$$P_{\text{абс.5}} =$$

4.3. Розрахувати годинну об'ємну витрату повітря першого ступеня,  $\frac{\text{м}^3}{\text{год}}$

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S \cdot 60 \cdot n \quad (5.10)$$

$D$  – діаметр циліндра першого ступеня,  $D = 0,1015$  м;  $S$  – хід поршня першого ступеня,  $S = 0,092$  м;  $n$  – кількість обертів колінчастого вала компресора,  $n = 720$  об/хв.

$$V_1 =$$

4.4. З рівняння стану для довільної маси газу розрахувати масову витрату повітря,  $\frac{\text{кг}}{\text{год}}$

$$M = \frac{P_6 \cdot V_1}{R_{\text{нов}} \cdot T_1} = \quad (5.11)$$

4.5. Розрахувати годинну об'ємну витрату повітря на виході з першого ступеня,  $\frac{\text{м}^3}{\text{год}}$

$$V_2 = M \cdot \frac{R_{\text{нов}} \cdot T_2}{P_{\text{абс}2}} = \quad (5.12)$$

4.6. Розрахувати годинну об'ємну витрату повітря на виході з проміжного холодильника,  $\frac{\text{м}^3}{\text{год}}$

$$V_3 = V_2 \cdot \frac{T_3}{T_2} = \quad (5.13)$$

При цьому враховується, що процес охолодження протікає при постійному тиску  $P_3 = P_2$ .

4.7. Розрахувати годинну об'ємну витрату повітря на виході з другого ступеня,  $\frac{\text{м}^3}{\text{год}}$

$$V_4 = M \cdot \frac{R_{\text{нов}} \cdot T_4}{P_{\text{абс}4}} = \quad (5.14)$$

Отримані таким чином данні дозволяють розрахувати показники політропи стиску повітря у першому  $n_1$  та другому  $n_2$  ступенях і роботу яка необхідна на привід компресора при умовах політропного, адіабатного і ізотермічного стиснення.

4.8. Розрахувати показники політропи стиску повітря для першого та другого ступенів

$$n_1 = \frac{\ln \frac{P_{\text{абс}2}}{P_6}}{\ln \frac{V_1}{V_2}} = \quad (5.15)$$

$$n_2 = \frac{\ln \frac{P_{a6c4}}{P_{a6c3}}}{\ln \frac{V_3}{V_4}} = \quad (5.16)$$

4.9. Розрахувати роботу яка необхідна для приводу компресора при умові:

- політропного стиснення повітря, Дж/кг

$$L_n = L_{In} + L_{2n}, \quad (5.17)$$

$$L_{In} = \frac{n_1}{n_1 - 1} (P_{a6c2} \cdot V_2 - P_{\sigma} \cdot V_1) = \quad (5.18)$$

$$L_{2n} = \frac{n_2}{n_2 - 1} (P_{a6c4} \cdot V_4 - P_{a6c3} \cdot V_3) = \quad (5.19)$$

$$L_n =$$

- адіабатного стиснення повітря, Дж/кг

$$L_A = L_{IA} + L_{2A}, \quad (5.20)$$

$$L_{IA} = \frac{k_1}{k_1 - 1} (P_{a6c2} \cdot V_2 - P_{\sigma} \cdot V_1) = \quad (5.21)$$

$$L_{2A} = \frac{k_2}{k_2 - 1} (P_{a6c4} \cdot V_4 - P_{a6c3} \cdot V_3) = \quad (5.22)$$

$k$  – показник адіабати, для повітря, прийємо  $k = 1,4$ .

Робота ізотермічного стиснення повітря, Дж/кг

$$L_T = L_{IT} + L_{2T}, \quad (5.23)$$

$$L_{IT} = M \cdot R_{нов} \cdot T_1 \cdot \ln \frac{P_{a6c2}}{P_{\sigma}} = \quad (5.24)$$

$$L_{2T} = M \cdot R_{нов} \cdot T_3 \cdot \ln \frac{P_{a6c4}}{P_{a6c3}} = \quad (5.25)$$

$$L_T =$$

4.10. Розрахувати необхідну потужність яка споживається компресором при умові:

- політропного стиснення повітря, кВт



$$N_n = \frac{L_n}{3600} \cdot 10^{-3} = \quad (5.26)$$

- адіабатного стиснення повітря, кВт

$$N_A = \frac{L_A}{3600} \cdot 10^{-3} = \quad (5.27)$$

- ізотермічного стиснення повітря, кВт

$$N_T = \frac{L_T}{3600} \cdot 10^{-3} = \quad (5.28)$$

4.11. Всі обраховані значення занести в таблиці 5.2 та 5.3.

**Таблиця 5.2**  
Результати розрахунків

$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$M$	$n_1$	$n_2$
Па					м <sup>3</sup> /ГОД				кг/ГОД		

**Таблиця 5.3**  
Результати розрахунків

$L_n$	$L_A$	$L_T$	$N_n$	$N_A$	$N_T$
Дж/ГОД			кВт		

4.12. Зробити висновки за результатами роботи: порівняйте значення робіт, затрачених на стиснення повітря у процесах, вказавши у якому з них **найбільші** і **найменші** затрати роботи, потужності, що необхідні для приводу компресора  $N_T$ ,  $N_n$ ,  $N_A$ .

## Висновки

- 1.
- 2.
- 3.

## 5. Контрольні питання

5.1. Що таке нагнітання?

5.2. Назвіть найпоширеніші типи компресорів.

5.3. Поясніть роботу одно- і двоступеневого компресора, використовуючи  $P - V$  та  $T - s$  діаграми.

5.4. Виведіть формули для визначення результуючої роботи компресора при ізотермічному стисненні.

5.5. Виведіть формули для визначення результуючої роботи компресора при політропному стисненні.

5.6. Виведіть формули для визначення результуючої роботи компресора при адіабатному стисненні.

5.7. Чому багатоступеневе стиснення (яке?) вигідніше, ніж одноступеневе?

### Література

1. Приходько М.А., Герасимов Г.Г. Термодинаміка та теплопередача. Рівне, 2008, - 250 ст.
2. Алабовский А.Н., Недужий И.А. Техническая термодинамика и теплопередача. Киев: Высшая школа, 1990.-255 с.
3. Драганов Б.Х., Долінський А.А., Міщенко А.В., Письменний Є.М. і ін. Теплотехніка.- Київ: „ІНКООС”, 2005.- 504 с.
4. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. – Підруч. для студ. енерг. спец. вищ. навч. закл. – Київ: Техніка, 2006. – 320 с.
5. Константинов М.С. Теплообмін: Підручник. – Київ: ВПІ ВПК „Політехніка”: Інрес, 2005. – 304 с.

### Лабораторна робота № 6

**Тема:** Цикли поршневих двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Теплотехнічне дослідження карбюраторного ДВЗ.

**Мета роботи:** Вивчити та дослідити особливості циклу ДВЗ з підводом тепла при постійному об'ємі, визначити величини, що характеризують його роботу, оцінити якість роботи ДВЗ.

#### 6.1 Загальні відомості

Машини, у яких хімічна енергія палива перетворюється в теплову, а теплова – в механічну роботу одночасно в одному пристрої, називаються двигунами внутрішнього згорання.

Цикли ДВЗ поділяють на ідеальні, в них відсутні втрати енергії; теоретичні, в них приймається, що згорання палива повне (без втрат); робочі – цикли реальних ДВЗ.

Всі цикли поділяють на три основні групи:

1. Цикл ДВЗ з підводом тепла при *постійному об'ємі* (цикл Отто), за цим циклом працюють *карбюраторні двигуни*, в них робоча суміш готується до всмоктування в циліндр – у *карбюраторі*, а її загорання в циліндрі виникає від *іскри запалення*. Такий цикл складається з двох адіабат та двох ізохор, див. рис. 6.1. *Адiabата 1-2* відповідає стисненню горючої суміші, *ізохора 2-3* – згорання суміші (підвід тепла  $q_1$ ), внаслідок цього тиск підвищується до  $p_3$ . Після продукти згорання *адіабатно розширюються* (робочий процес 3-4). В *ізохорному* процесі 4-1 (випуск) від продуктів згорання відводиться тепло  $q$ .

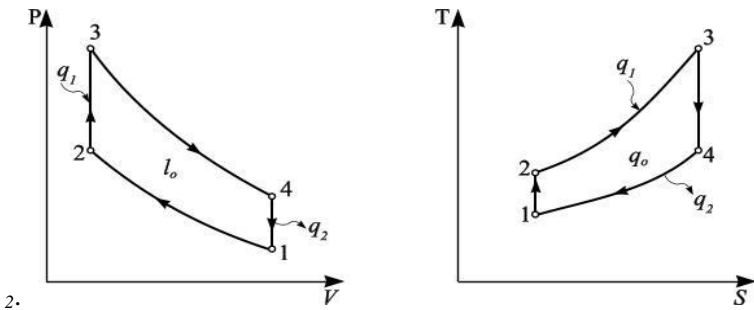


Рис. 6.1. Цикл ДВЗ з ізохорним підведенням теплоти у "p – v" та "T – s" координатах.

Термічний ККД циклу: 
$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}, \quad (6.1)$$

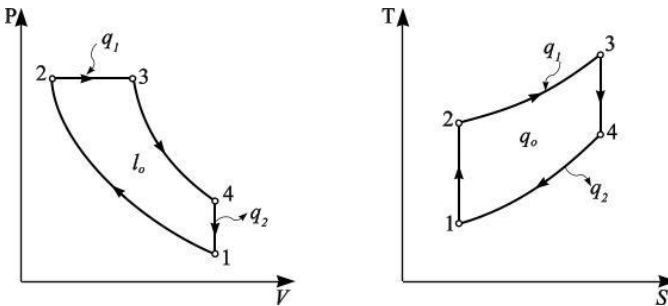
k- константа адіабатного процесу.

2. Цикл ДВЗ з підводом тепла при *постійному тиску* (цикл Дизеля). За цим циклом працюють *компресорні дизелі*. Цикл складається з двох адіабат, ізобари та ізохори (рис. 8.2). У цих двигунах спочатку адіабатно

стискається, процес 1-2, чисте повітря; його температура підвищується до необхідної для *самозаймання палива*. Далі *ізобарно, процес 2-3*, спеціальною форсункою високого тиску впрыскують паливо, яке самозаймається і горить (підвід тепла  $q_1$ ). Далі, продукти згоряння адіабатно розширюються здійснюючи *робочий хід* (процес 3-4). В ізохорному процесі 4-1 (випуск) від продуктів згоряння відводиться тепло  $q_2$ .

Термічний ККД циклу:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{k \cdot (\rho - 1)}, \quad (8.2)$$



**Рис. 6.2.** Цикл ДВЗ з ізобарним підводом теплоти у "  $p - v$ " та "  $T - s$ " координатах

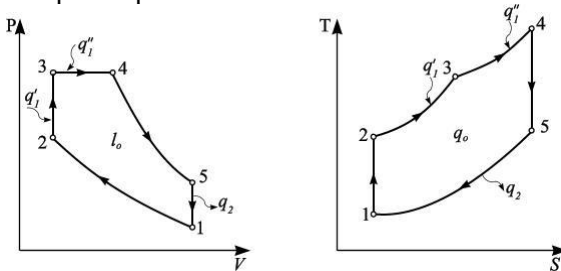
3. Цикл ДВЗ *зі змішаним підводом* тепла (цикл **Тринклера**). Так працюють *безкомпресорні* дизельні двигуни, у яких впрыск і розпилення палива здійснюється паливним насосом високого тиску, а пальна суміш самозаймається завдяки високій температурі стисненого в циліндрі повітря (600 - 650 °C).

Цикл складається з двох адіабат, двох ізохор та ізобари (див. рис. 8.3). Горіння палива у цьому двигуні відбувається спочатку при постійному об'ємі (процес 2-3) з підвищенням тиску, далі при постійному тиску (процес 3-4). Після чого продукти згоряння адіабатно розширюються здійснюючи *робочий хід* (процес 4-5). В ізохорному процесі 5-1 (випуск) продукти згоряння віддають теплоту  $q_2$ .

Термічний ККД циклу:

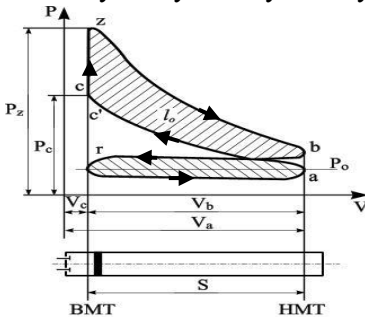
$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)}, \quad (6.3)$$

$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$  - ступінь стиску;  $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$  - ступінь підвищення тиску,  $\rho = \frac{v_4}{v_3}$  - ступінь початкового розширення.



**Рис. 6.3.** Цикл ДВЗ зі змішаним підводом теплоти у "p - v" та "T - s" координатах

Реальну зміну об'єму і тиску в процесі роботи ДВЗ характеризує його **індикаторна діаграма**. Індикаторна діаграма не відображає термодинамічні процеси, а є зображенням зміни об'єму та тиску в робочому циклі ДВЗ.



г-а – всмоктування робочої суміші; а-с – стиск робочої суміші; с' – подача іскри; с – початок горіння; с-з – горіння при постійному об'ємі; z- b – розширення газів;

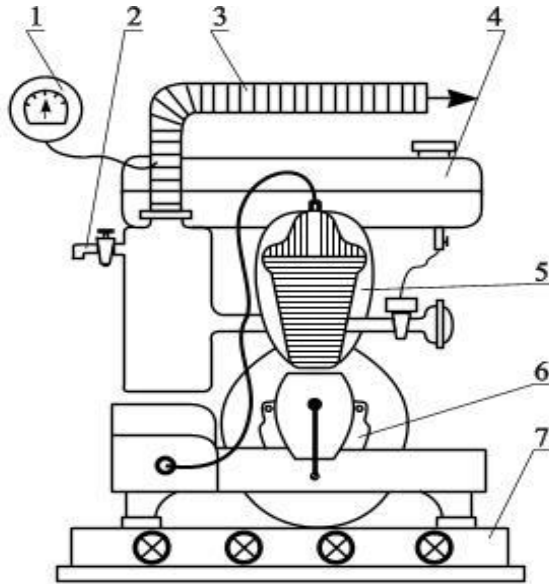
**Рис. 6.4.** Індикаторна діаграма. б-г –

випуск газів;  $P_0$  – лінія атмосферного тиску;  $P_c$  – тиск стиску;  $P_z$  – тиск в кінці згорання;  $V_a$  – повний об'єм;  $V_b$  – робочий об'єм;  $V_c$  – об'єм камери згорання;  $S$  – хід поршня.

## 6.2 Схема і опис лабораторної установки

Двигун СДВ 2 – двотактний, карбюраторний, одноциліндровий. Ефективна потужність двигуна  $N_e = 2$  к.с; ступінь стиску  $\varepsilon = 6,5 - 0,5$ ; кількість обертів вала двигуна  $n = 3000$  об/хв; діаметр циліндра  $D = 52$  мм; хід поршня  $S = 58$  мм. Двигун навантажений на регульований ламповий реостат

Схема установки представлена на рис. 6.5.



**Рис. 6.5.** Лабораторний двигун внутрішнього згорання.

1 – термопара з термометром; 2 – кран відводу газу; 3 – вихлопна труба; 4 – паливний бак; 5 – двигун; 6 – генератор; 7 – реостат.

Підготовка до роботи, пуск та обслуговування двигуна виконуються за інструкцією лаборантом.

Після зняття даних вимірювань виконати розрахунки і заповнити табл. 6.1 відповідно до формул наведених у таблиці.

Зверніть увагу на величину коефіцієнтів  $\alpha$ ,  $\eta_E$ ,  $g_E$  і балансу тепла та зробіть відповідні висновки. Зокрема за величиною коефіцієнту  $\eta_E$ , зробіть висновок щодо енергетичної ефективності ДВЗ. Куди, на вашу думку, витрачається основна кількість тепла, що виділяється при спалюванні палива? Що можна запропонувати для зменшення непродуктивних втрат тепла?

**Таблиця 6.1.**

Дослідні та розрахункові дані.

№ п/п	Найменування величини	Позначено	Од. виміру	Дослід. величина	Формули
1	Час досліджу	$\tau$	хв.	5	За секундоміром
2	Барометричний тиск	$P_b$	мм.рт.с Т.		За барометром
3	Паливо - бензин А-76	-	-	-	-
4	Склад робочої суміші				
	<i>а/ вуглець</i>	$C^p$	%	85	За довідником
	<i>б/ водень</i>	$H^p$	%	14	"-
	<i>в/ кисень</i>	$O^p$	%	1	"-
	<i>г/ густина палива</i>	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	750	"-
5	Нижча теплота згоряння палива	$Q_{H}^p$	кДж/кг		$Q_{H}^p = 338 \cdot C^p + 1025 \cdot H^p - 108 \cdot O^p$
6	Годинна витрата палива	$B$	кг/год		$B = \epsilon \cdot 12$
7	Витрата палива за дослід	$\epsilon$	кг		$\epsilon = S_b \cdot n \cdot \rho$
8	Зміна рівня палива у паливному баці	$h$	м		$h = \Delta h \cdot \sin \psi$
9	Рівень палива у вимірній трубці	$\Delta h$	м		За вимірюванням
10	Кут нахилу вимірної трубки	$\psi$	град.	18	"-
11	Площа паливного бака	$S_b$	м <sup>2</sup>	0,0841	"-
12	Температура зовнішнього середовища	$t_{н.с}$	°С		За термометром
13	Температура вихідних газів	$t_{вих}$	°С		За термопарою
14	Характеристика палива /в частках/	$\beta$	-		$\beta = 2,37 \cdot \frac{H^p - O^p}{C^p} \cdot \frac{B}{V}$
15	Об'єм продуктів згоряння				
	<i>а) сума 3-х атомних газів</i>	$RO_2$	%	4	За газоаналізатором
	<i>б) кисень</i>	$O_2$	%	5	---
	<i>в) оксид вуглецю</i>	$CO$	%		$CO = \frac{(21 - \beta \cdot RO_2) - (RO_2 + O_2)}{0,605 + \beta}$
	<i>г) азот</i>	$N_2$	%		$N_2 = 100 - (RO_2 + O_2 + CO)$
16	Коефіцієнт надлишку повітря	$\alpha$			$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{32}{21 \cdot O_2} - \frac{CO}{N_2}}$

17	Напруга	$U$	Вольт		За вольтметром
18	Сила струму	$I$	Ампер		За амперметром
19	ККД генератора	$\eta_g$	-	0,95	За довідником
20	Косинус	$\cos\varphi$	-	0,8	-
21	Ефективна потужність	$N_E$	л.с.		$N_E = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot 1,36}{1000 \cdot \eta_g}$
22	Ефективний ККД	$\eta_E$	%		$\eta_E = \frac{2645 \cdot N_E}{B \cdot Q_H^P} \cdot 100$
23	Питома витрата палива	$g_E$	с.ч.		$g_E = \frac{1000 \cdot B}{N_E}$
24	Тепловий баланс				
	<i>а) тепло внесене паливом у двигун</i>	$Q_{зас}$	кДж/ГОД		$Q_{зас} = B \cdot Q_H^P$
	<i>б) корисно використане тепло</i>	$Q_1$	кДж/ГОД		$Q_1 = 2645 \cdot N_E$
	<i>в) тепло втрачене з вихлопними газами</i>	$Q_2$	кДж/ГОД		$Q_2 = \left[ \begin{array}{l} 0,32 \cdot C^P \\ 0,54 \cdot CO + 0,48 \cdot \\ 9 \cdot H^P \cdot (t_{max} - t_{sc}) \end{array} \right] \cdot 3,49$
	<i>г) залишковий член теплового балансу</i>	$Q_3$	кДж/ГОД		$Q_3 = Q_{зас} - (Q_1 + Q_2)$
	<i>д) перевірка теплового балансу</i>	$Q_{пр}$	кДж/ГОД		$Q_{пр} = Q_1 + Q_2 + Q_3$

### 6.3 Контрольні питання

3.1. Поясніть, що таке ДВЗ?

3.2. Поясніть, чим відрізняються ідеальний, теоретичний та робочий цикли ДВЗ?

3.4. Зобразіть і поясніть цикл ДВЗ зі змішаним підводом тепла на  $P$ - $V$  і  $T$ - $S$  діаграмах.

3.5. Зобразіть і поясніть цикл ДВЗ з підводом тепла при сталому тиску на  $P$ - $V$  і  $T$ - $S$  діаграмах.

3.6. Зобразіть і поясніть цикл ДВЗ з підводом тепла при сталому об'ємі на  $P$ - $V$  і  $T$ - $S$  діаграмах.

3.7. Поясніть формули для термічного ККД циклу: зі змішаним підводом тепла; з підводом тепла при сталому тиску;

3.8. Що таке такт, хід поршня і об'єм циліндра?

3.9. Поясніть, що таке коефіцієнт надлишку повітря?

3.10. Зобразіть і поясніть індикаторну діаграму циклу карбюраторного ДВЗ.



## Лабораторна робота № 7

**Тема:** Дослідити особливості приготування біогазу з відходів сільськогосподарського виробництва.

**Мета роботи:** Вивчити техніку та розрахувати установку отримання біогазу і його характеристики.

### 7.1 Загальна характеристика анаеробного розкладу органіки

Анаеробний розклад – це розклад органіки без доступу кисню спеціальними бактеріями. За умови застосування анаеробного розкладу біомаса розкладається на метан  $\text{CH}_4$  і оксид вуглецю  $\text{CO}_2$ . Частка енергії метану складає до 90 % від тієї, що містилась в первинній речовині. Термін «біопаливо» охоплює всі види транспортного або рідкого палива, які виробляють з біомаси. Форми біомаси для її використання як біопалива є досить різноманітними. Біомаса, як енергетичний ресурс може мати декілька напрямів використання: її можна спалювати (у вигляді тирси, деревини, паливних брикетів, гранул), переробляти у рідкі біопалива (біоетанол, біодизель), а також виготовляти біогаз. Класифікація біопалива можлива за такими видами, рис. 7.1.



**Рис. 7.1.** Класифікація видів біопалива. частка біопалива та відходів в структурі виробництва палива з відновлюваних джерел зростає до 81%. Наприклад, в Україні біопаливо дозволило замінити 3,5 млрд  $\text{m}^3$  природного газу.

Суміш метану і оксиду вуглецюза наявності в невеликій кількості інших газів називають **біогазом**.

Його склад: (55-80)% метану  $\text{CH}_4$ , (15-40)% вуглекислого газу  $\text{CO}_2$ , (0-1)% сірководню  $\text{H}_2\text{S}$ , (0-1)% азоту  $\text{N}_2$ , (0-1) % водню  $\text{H}_2$ . Теплота згорання залежно від складу становить (21-27) МДж/м<sup>3</sup>. Крім отримання біогазу анаеробний розкладповністю мінералізує азот, фосфор, калій та інші мікроелементи, завдяки чому вони краще засвоюються рослинами. Таким чином ця технологія дозволяє виробляти біопаливо і переробляє відходи на добриво.

Основна сировина для виробництва біогазу – це відходиваринництва. Для цього також можна використовувати силос, солому і побутові відходи.

З 1 тони відходів переважно можна отримати (250-500) м<sup>3</sup> біогазу. Температура за якої відбувається анаеробний розклад складає (20-70)°С. Процес анаеробного розкладу як правило триває (5-15) діб: за вищої температури розкладу, його тривалість зменшується. Схему біогазової установки показано на рис. 7.2 .

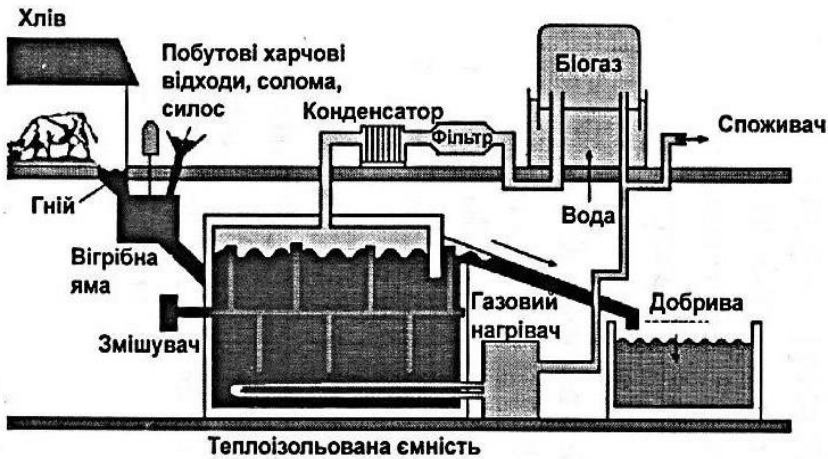
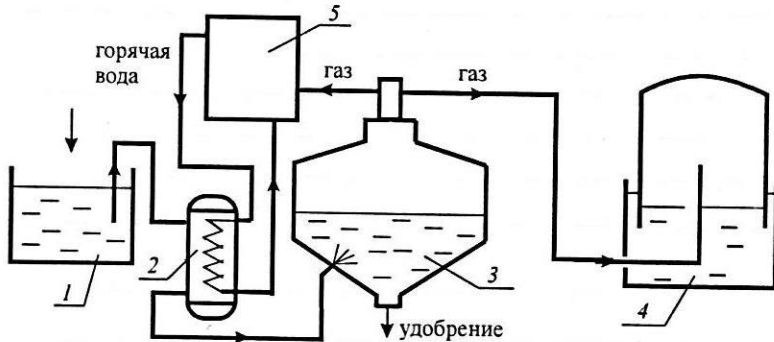


Рис. 7.2. Схема біогазової установки .

Отримання біогазу в метантенках стає екологічно і економічно вигідним, коли в ньому переробляють потоки відходів, які близько розташовані. Наприклад, відходи тваринницьких ферм, боєнь, стоки каналізаційних систем і т. п. Економічність в цьому випадку пов'язана з тим, що немає потреби в попередньому зборі відходів, в організації та управлінні процесом їх подачі. ККД метантенка, який визначається як відношення енергії біогазу до енергії вихідного сухого матеріалу, досягає 60-90%. Схема біогазової установки представлена на рис. 7.3.



**Рис.7.3.** Схема біогазової установки .

Сировина, що містить 2-10% органічних речовин, з відстійника 1 через теплообмінник 2, де вона підігривається до температури ферментації, подається в метантенку 3.

Метантенки виконуються із залізобетону, сталі або полімерних матеріалів. Вони можуть мати різну форму і конструкцію, від кубічної до циліндричної, розташовані горизонтально або вертикально. Найбільшого поширення набули метантенки яйцеподібної і циліндричної конструкції з конусною підставою. Метантенки забезпечуються мішалками для перемішування зброджуваної маси з метою прискорення процесів і теплообмінниками для підтримання необхідної температури біомаси. Перемішування сприяє рівномірному розподілу поживних речовин в об'ємі реактора і перешкоджає утворенню осаду на дні метантенки. За відсутності перемішування на поверхні біомаси спочатку утворюється піна, а потім тверда кірка, яка може привести до повної зупинки процесу зброджування.

Утворені гази видаляються через газовий ковпак, розташований у верхній частині метантенки. Газ газопроводом надходить в котел 5 або в газосховище - газгольдер 4. З кожної тони гною виділяється в середньому 50 м<sup>3</sup> біогазу. Метанове бродиння – процес ендотермічний,

вимагає постійного підігріву для підтримки необхідної температури ферментації. Як правило, метантенки та сировину підігрівають спалюванням утвореного біогазу. В середньому на підтримку потрібної температури ферментації витрачається від 15-20% (мезофільний процес) до 30-50% (термофільний процес) біогазу. Тому одним з важливих моментів експлуатації метантенків є їх хороша теплоізоляція. Процес бродіння біомаси в метантенку йде досить довго. Спочатку розпадаються органічні речовини з легким розкладанням і з найбільшим виходом біогазу, а потім починають розпадатися органічні речовини з важчим розкладанням і з помітно меншою швидкістю виходу біогазу. Тому, виходячи з економічних міркувань, на практиці час тривалості процесу бродіння вибирають рівним часу розкладання до 40-50% органічних речовин (від 8 до 20 діб).

У багатьох країнах світу створені та введені в експлуатацію малогабаритні фермерські та великі промислові установки з переробки гною в біогаз. Наприклад, у Швейцарії налічується понад 200 установок. Більшість з них працює при температурі 28-37°C.

Є установки, розташовані під підлогою корівника, що дозволяє максимально використовувати тепло гною. В Індії працює **понад 500 тис. біогазових установок**, і тому біогаз покриває на 44% потреби країни в електроенергії. Успішно використовують біогазові установки в Голландії, Великобританії, Китаї та інших країнах.

## 7.2 Визначення технічних параметрів метантенку

Об'єм відстійника гною:

$$V_n = k \cdot m_d \cdot t_{cб} / \rho_n, \quad (7.1)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що враховує зміну щільності гною залежно від початкової вологості ( $k = 1,5$ );  $t_{cб}$  – період накопичення гною – тривалість зброджування в метантенку (від 8 до 20 діб);  $m_d$  – добовий вихід гною з початковою вологістю  $\omega$  (близько 92%), кг/добу;

$$\omega = \frac{m_{\varrho}}{m_{0\varrho}} = \frac{m_{\varrho} - m_{0\varrho}}{m_{0\varrho}}. \quad (7.2)$$

Тоді  $m_{0\varrho} = m_d(1 - \dot{\varrho})$ , (7.3)

де  $m_{0\varrho}$  – добовий вихід сухого зброджуваного матеріалу, кг / добу;  $\rho_n$  – щільність гною, кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_n = 1020$  кг/м<sup>3</sup>).

1. Об'єм метантенка:

$$V_M = m_{0\varrho} \cdot t_{cб} \cdot v, \quad (7.4)$$

де  $v$  - питома вага рідкої маси на 1 кг сухого збродженого маєріалу,  $v = 0,02 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

2. Добовий вихід біогазу,  $\text{м}^3/\text{добу}$ :

$$B_{\bar{o}} = m_{0\bar{o}} \cdot b, \quad (7.5)$$

де  $b$  – питома вихід біогазу, що припадає на 1 кг переробленого ґною (від 0,2 до 0,4  $\text{м}^3/\text{кг}$ ).

3. Загальна теплова енергія одержуваного біогазу, МДж/добу:

$$Q_{\text{заг}} = B_{\bar{o}} \cdot Q_{\bar{o}}, \quad (7.6)$$

де  $Q_{\bar{o}} = 20\text{-}25 \text{ МДж}/\text{м}^3$  – теплота згоряння біогазу.

4. Витрата теплоти на нагрівання рідкої маси в метантенку (МДж/добу) з  $t_1 = 15^\circ \text{C}$  до  $t_2 = 35^\circ \text{C}$  (мезофільних режим).

$$Q_n = c_n \cdot m_{0\bar{o}} \cdot v \cdot \rho_n (t_2 - t_1) / \eta, \quad (7.7)$$

де  $c_n$  - теплоємність рідкої маси ( $c_n = 0,00406 \text{ МДж}/(\text{кг}\cdot\text{C})$ );  $\eta$  – ККД нагрівального пристрою ( $\eta = 0,7$ ).

5. Витрата теплоти на власні потреби, МДж/добу:

$$Q_{\text{в.н}} = 1,06 Q_n, \quad (7.8)$$

де 1,06 - коефіцієнт, що враховує теплові втрати.

6. Загальна кількість біогазу, що йде на власні потреби,  $\text{м}^3/\text{добу}$ :

$$B_{\text{в.н}} = Q_{\text{в.н}} / Q_{\bar{o}}. \quad (7.9)$$

7. Вихід товарного біогазу,  $\text{м}^3/\text{добу}$ :

$$B_{\bar{o}.m} = B_{\bar{o}} - B_{\text{в.н}} \quad (7.10)$$

9. Коефіцієнт витрати біогазу на власні потреби (0,15-0,5):

$$\varphi_{\bar{o}} = B_{\text{в.н.}} / B_{\bar{o}}. \quad (7.11)$$

10. Об'єм газу в газгольдері,  $\text{м}^3$ :

$$V_z = t_{\text{н.}\bar{o}} \cdot B_{\bar{o}.m}, \quad (7.12)$$

де  $t_{\text{н.}\bar{o}}$  – період накопичення біогазу, діб;  $t_{\text{н.}\bar{o}} = t_{\text{с.}\bar{o}}$ .

10. Теплова потужність пристрою (МДж/добу), що використовує біогаз, розраховується за формулою

$$N = \eta_n \cdot Q_n^p \cdot B_{\bar{o}.m} \cdot f_m, \quad (7.13)$$

де  $\eta_n$  – ККД пристрою для спалювання газу;  $Q_n^p$  – теплота згоряння метану при нормальних фізичних умовах,  $Q_n^p = 28 \text{ МДж}/\text{м}^3$ ;  $f_m = r_{\text{МН4}}$  – об'ємна частка метану в біогазі.

### 7.3 Розрахунок газгольдера

Тиск в газгольдері низького тиску визначається вагою дзвона (ковпака) або вантажу:

$$p_z = (mg)/S, \quad (7.14)$$

де  $m$ ,  $S$  - маса і площа горизонтальної проекції дзвона або вантажу відповідно.

Приймаємо дзвін газгольдера циліндричної форми з діаметром  $D$  і висотою  $H = 1,5 D$ . Тоді діаметр газгольдера можливо визначити з рівняння

$$1,2V_z = (\pi D^2/4) \cdot H = (\pi D^2/4) \cdot 1,5D. \quad (7.15)$$

$$D = \sqrt[3]{1,02V_z}. \quad (7.16)$$

$$S = \pi D^2/4. \quad (7.17)$$

Об'єм металу в газгольдері  $V_m$  при товщині стінок  $\delta = 6 \dots 12$  мм становить ( $m^3$ )

$$V_m = 1,1[\pi \cdot D \cdot \delta \cdot H + (\pi D^2/4) \cdot \delta]. \quad (7.18)$$

Маса металу в газгольдері

$$m = \rho_m \cdot V_m. \quad (7.19)$$

де  $\rho_m$  – густина металу,  $\rho_m = 2700$  кг/ $m^3$ .

Маса газу в газгольдері визначається з рівняння Клапейрона- Менделєєва:

$$pV_z = m_z \cdot R \cdot T, \quad (7.20)$$

де  $m_z$  - маса біогазу;  $R$  - газова постійна біогазу;  $T$  - температура біогазу,  $p$  – абсолютний тиск в газгольдері, причому

$$p = p_z + p_{am}, \quad (7.21)$$

де  $p_{am}$  атмосферний тиск,  $p_{am} = 101325$  Па.

Газова стала біогазу  $R$  залежить від його складу. Якщо склад біогазу заданий об'ємними частками  $r_{CH_4}$  та  $r_{CO_2}$ , то кіломоль  $\mu$  визначається за формулою

$$\mu = \mu_{CH_4} \cdot r_{CH_4} + \mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2}. \quad (7.22)$$

Тоді газова стала біогазу (Дж/(кг·К))

$$R = R_u/\mu = 8314/\mu, \quad (7.23)$$

де  $R_{\mu}$  – універсальна газова стала,  $R_{\mu} = 8314$  Дж/(кг·К).

Температуру біогазу (К) приймаємо рівною температурі до-  
вкілля  $T = T_{o.c.}$ .

$$T_{o.c.} = t_{o.c.} + 273, \quad (7.24)$$

де  $t_{o.c.}$  – температура довкілля, °С.

Перепад рідини зовні і під дзвоном в мокрому газгольдері ви-  
значається з основного рівняння гідростатики:

$$h = p_d / (\rho g). \quad (7.25)$$

#### 7.4 Практичне завдання

Визначити об'єм відстійника гною, об'єм метантенка, добовий вихід біогазу в установці, яка утилізує гній при періоді накопичення  $t_{cb}$ ; добовому виході гною  $m_d$ ; щільності гною  $\rho_n = 1020$  кг/м<sup>3</sup>; питомій вазі рідкої маси на 1 кг сухого бродильного матеріалу  $v = 0,02$  м<sup>3</sup>/кг; питомому виході біогазу, що припадає на 1 кг переробленого гною  $b$  (м<sup>3</sup>/кг).

Визначити загальну теплову енергію отриманого біогазу  $Q_{заг}$ , витрату теплоти на нагрівання рідкої маси в метантенку  $Q_n$ , витрату теплоти на власні потреби  $Q_{e,n}$ ; загальну кількість біогазу, що йде на власні потреби  $B_{e,n}$ ; вихід товарного біогазу  $B_{б,т}$ ; об'єм газу в газгольдері  $V_g$ ; теплову потужність пристрою, що використовує біогаз,  $N$ : якщо склад біогазу заданий об'ємними частками  $r_{CH_4}$  та  $r_{CO_2}$ ; теплота згорання метану при нормальних фізичних умовах,  $Q_u^p = 28$  МДж/м<sup>3</sup>; ККД пристрою для спалювання газу  $\eta_n$ . Розрахувати розміри газгольдера, якщо температура довкілля  $t_{o.c.}$ .

Вихідні дані за варіантами наведені в таблицях 7.1 і 7.2.

**Таблиця 7.1**  
Початкові дані

Варіант Параметри	Остання цифра залікової книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Період накопич. гною $t_{cb}$ , діб	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Добовий вих. гною $m_0$ , кг/добу	68	55	60	55	48	65	62	65	50	52
Питом вих. біогазу $b$ , $m^3/kg$ .	0,4	0,2	0,35	0,25	0,42	0,22	0,47	0,27	0,3	0,32
Об'єм. част. біогазу $r_{CH_4}$ , %	80	55	75	60	70	65	57	62	77	68
Об'ємна частка $CO_2$ $r_{CO_2}$ , %	20	45	25	40	30	35	43	38	23	32

**Таблиця 7.2**

Варіант Параметри	Передостання цифра залікової книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ККД пристрою спалювання газу $\eta_n$	0,62	0,64	0,66	0,68	0,7	0,75	0,72	0,74	0,69	0,67
Температура середовища $t_{o.c.}$ °С	15	21	19	18	17	16	25	22	23	24
Вологість гною $\omega$	0,8	0,82	0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,76	0,78

### 7.5 Приклад розрахунку

Вихідні дані:

Період накопичення гною $t_{cb}$ , діб.....	21
Добовий вихід гною $m_0$ , кг/доба.....	52
Питомий вихід біогазу $b$ , $m^3/kg$ .....	0,37
Об'ємна частка біогазу $r_{CH_4}$ , % .....	72
Об'ємна частка біогазу $r_{CO_2}$ , % .....	28
ККД пристрою для спалювання газу $\eta_n$ .....	0,71
Температура оточуючого середовища $t_{o.c.}$ °С .....	26



Вологість гною □ .....0,92

### 5.1. Розрахунок метантенка

1. Об'єм відстійника гною за формулою (6.1):

$$V_n = k \cdot m_o \cdot t_{c\bar{o}} / \rho_n = 1,5 \cdot 52 \cdot 21 / 1020 = 1,6 \text{ м}^3.$$

Добовий вихід сухого збродженого матеріалу, кг / добу за формулою (6.3)

$$m_{o\bar{o}} = m_o(1 - \dot{\omega}) = 52(1 - 0,92) = 4,16 \text{ кг/добу.}$$

2. Об'єм метантенка за формулою (6.4) при  $v = 0,02 \text{ м}^3/\text{кг}$

$$V_m = m_{o\bar{o}} \cdot t_{c\bar{o}} \cdot v = 4,16 \cdot 21 \cdot 0,02 = 1,74 \text{ м}^3.$$

3. Добовий вихід біогазу за формулою (6.5):

$$B_{\bar{o}} = m_{o\bar{o}} \cdot b = 4,16 \cdot 0,37 = 1,54 \text{ м}^3/\text{добу.}$$

4. Загальна теплова енергія одержуваного біогазу  $Q_{з\bar{a}z}$  за формулою (6.6) МДж/добу:

$$Q_{з\bar{a}z} = B_{\bar{o}} \cdot Q_{\bar{o}} = 1,54 \cdot 20,16 = 31 \text{ МДж/добу, де } Q_{\bar{o}} = Q_n^p \mu_{CH_4} = 28 \cdot 0,72 = 20,16 \text{ МДж/м}^3$$

5. Витрата теплоти на нагрівання рідкої маси в метантенкуз  $t_1 = 15^\circ \text{C}$  до  $t_2 = 35^\circ \text{C}$  (мезофільних режим) за формулою (6.7) при  $c_n = 0,00406 \text{ МДж/(кг}\cdot\text{C)}$ ,  $\eta = 0,7$  і  $\rho_n = 1020 \text{ кг/м}^3$

$$Q_n = c_n \cdot m_{o\bar{o}} \cdot v \cdot \rho_n (t_2 - t_1) / \eta = 0,00406 \cdot 4,16 \cdot 0,02 \cdot 1020 (35 - 15) / 0,7 = 9,84 \text{ МДж/добу.}$$

6. Витрата теплоти на власні потреби, за формулою (6.8)

$$Q_{в,n} = 1,06 Q_n = 1,06 \cdot 9,84 = 10,43 \text{ МДж/добу}$$

7. Загальна кількість біогазу, що йде на власні потреби за формулою (6.9)  $\text{м}^3/\text{добу}$ :

$$B_{в,n} = Q_{в,n} / Q_{\bar{o}} = 10,43 / 20,16 = 0,517 \text{ м}^3/\text{добу.}$$

8. Вихід товарного біогазу за формулою (6.10)

$$B_{\bar{o},m} = B_{\bar{o}} - B_{в,n} = 1,54 - 0,517 = 1,023 \text{ м}^3/\text{добу.}$$

9. Коефіцієнт витрати біогазу на власні потреби за формулою (6.11)

$\varphi_{\bar{o}} = B_{в,n} / B_{\bar{o}} = 0,517 / 1,54 = 0,336$ : що знаходиться в рекомендованих межах (0,15-0,5).

10. Об'єм газу в газгольдері за формулою (6.12),  $\text{м}^3$ : при

$$t_{n,\bar{o}} = t_{c,\bar{o}} = 21 \text{ доба}$$

$$V_z = t_{n,\bar{o}} \cdot B_{\bar{o},m} = 21 \cdot 1,023 = 21,48 \text{ м}^3.$$

11. Теплова потужність пристрою, що використовує біогаз, за формулою (6.13) при  $\eta_n = 0,71$ ;  $Q_n^p = 28 \text{ МДж/м}^3$ ;  $f_m = r_{CH_4} = 0,72$

$$N = \eta_n \cdot Q_n^p \cdot V_{б.т.} \cdot f_m = 0,71 \cdot 28 \cdot 1,023 \cdot 0,72 = 14,64 \text{ МДж/добу.}$$

### 7.5.2 Розрахунок газгольдера

Діаметр газгольдера за формулою (6.16)

Висота газгольдера  $H = 1,5 \cdot 2,8 = 4,2 \text{ м.}$

Площа горизонтальної проекції дзвона  $S$  за формулою (6.17)

$$S = \pi D^2/4 = 3,14 \cdot 2,8^2/4 = 6,15 \text{ м}^2.$$

Об'єм металу в газгольдері  $V_m$  за формулою (6.18) при товщині стінок  $\delta = 6 \text{ мм}$

$$\begin{aligned} V_m &= 1,1[\pi \cdot D \cdot \delta \cdot H + (\pi D^2/4) \cdot \pi] = \\ &= 1,1[3,14 \cdot 2,8 \cdot 0,06 \cdot 4,2 + 6,15 \cdot 0,06] = 2,84 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Маса металу в газгольдері за формулою (6.19) при  $\rho_m = 2700 \text{ кг/м}^3$

$$m = \rho_m \cdot V_m = 2700 \cdot 2,84 = 7668 \text{ кг.}$$

Тиск в газгольдері низького тиску визначається вагою дзвона за формулою (6.14)

$$p_z = (mg)/S = (7668 \cdot 9,81)/6,15 = 12231 \text{ Па.}$$

Абсолютний тиск в газгольдері за формулою (6.21) при

$$p_{ам} = 101325 \text{ Па}$$

$$p = p_z + p_{ам} = 12231 + 101325 = 113556 \text{ Па.}$$

Кідомоль суміші  $\mu$  як суміші ідеальних газів з об'ємними частками  $r_{CH_4} = 0,72$  і  $r_{CO_2} = 0,28$  визначається за формулою (6.22) при  $\mu_{CH_4} = 16 \text{ кг/кмоль}$  і  $\mu_{CO_2} = 44 \text{ кг/кмоль}$

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_{MN_4} \cdot r_{MN_4} + \mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2} = 16 \cdot 0,72 + 44 \cdot 0,28 = \\ &= 23,8 \text{ кг/кмоль.} \end{aligned}$$

Газова стала біогазу  $R$  за формулою (6.23)

$$R = R_{\mu}/\mu = 8314/\mu = 8314/23,8 = 310 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

Температур біогазу ( $T$ , К) приймаємо за формулою (6.24) рівною температурі довкілля  $T = T_{o.c.}$

$$T_{o.c.} = t_{o.c.} + 273 = 26 + 273 = 299 \text{ К.}$$

Маса газу в газгольдері з формули (6.20)

Перепад тиску рідини зовні і під дзвоном в мокрому газгольдері визначається з основного рівняння гідростатики (6.25)

$$h = p_s / (\rho g) = 12231 / (1000 \cdot 9,81) = 1,25 \text{ м.}$$

## Література

1. Гуцаленко Л. В., Фабіянська В. Ю. Стан та основні чинники розвитку виробництва біологічного палива в Україні і світі: Екологічні та економічні аспекти виробництва біопалива. *Наукові праці інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. Випуск 19. С. 168–174. URL:

[http://bioenergy.gov.ua/sites/default/files/articles/168\\_0.pdf](http://bioenergy.gov.ua/sites/default/files/articles/168_0.pdf)

2. Енергозбереження і енергоефективність -1. Конспект лекцій для студентів напрямку підготовки 6.050802 «Електронні пристрої та системи». Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 106 с. URL:

<https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/21708/1/EnergySaving%20I.pdf>

3. Методичні вказівки до проведення практичних робіт з курсу «Відновлювані джерела енергії». Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2012. 64 с.

4. Сухоцкий А. Б., Фарфаронов В. Н. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : курс лекций. Минск : БГТУ, 2009. 246 с.

5. Боблях С. Р., Мельничук В. С., Мельник В. С., Ігнатюк Р. М. Відновлювані джерела енергії : монографія. Луцьк : ВНУ, 2012. 227 с.

## 8 Самостійна робота студентів

Самостійна робота є основним засобом оволодіння навчальним матеріалом у час, вільний від аудиторних навчальних занять. Основні види самостійної роботи, які пропонуються студентам:

1. Вивчення лекційного матеріалу та основних термінів та понять щодо матеріалу лекцій.

2. Підготовка до лабораторних занять, дискусій, роботи в малих групах.

3. Робота з рекомендованою літературою.

4. Підготовка відповідей на контрольні питання у лекціях.

5. Перевірка студентом особистих знань, підготовка до модульних контролів

Таблиця 8.1.

## Теми самостійної роботи

№	Теми для самостійної роботи	Кількість годин	
		денна	заочна
1	Теплота і робота - форми обміну енергією між частинами ТДС та оточенням. Рівняння стану (Клапейрона-Менделєєва) та диференціальне рівняння стану. Рівноважні та нерівноважні процеси. Ентальпія та ентропія ТДС.	8	12
2	Ізотермічний та адіабатний процеси. Зображення процесів роботи та передачі тепла на діаграмах. Політропні процеси.	6	10
3	Максимальна робота. Поняття ексергії та ексергічний аналіз. Ексергія маси, потоку та теплоти. Ексергічні баланси і ККД теплових машин.	8	8
4	Фазові переходи. Правило фаз Гібса. Рівняння стану водяної пари. P-v, T-s та h-s діаграми водяної пари. Вологе повітря та його характеристики. Розрахунок характеристик вологого повітря за h-d діаграмою вологого повітря.	8	10
5	ККД прямого циклу та холодильний коефіцієнт зворотного (холодильного) циклів. Способи підвищення ефективності прямих і зворотних циклів	8	10
6	Види переносу тепла: теплопровідність, конвекція і випромінювання. Закони переносу тепла. Теплопровідність одношарової та багатошарової пластин. Моделювання тепловіддачі.	6	10
7	Водо-водяний тепловий насос. Ґрунтовий колектор і ґрунтові води. Розрахунок теплоперепадів в ґрунтовому колекторі. Повітряно-водяний тепловий насос. Вибір нижнього джерела енергії та ґрунтових зондів та колекторів.	8	10
8	Порівняльний аналіз схем утилізації теплоти в сушарнях з ТНУ. Використання ТНУ в процесах сушіння зернових.	8	12
	<b>Всього, годин</b>	<b>60</b>	<b>82</b>

**Зауваження**

Оцінка рівня освоєння здобувачами освіти питань, що виносяться на самостійне опрацювання робиться у вигляді звітів з виконання одного, або декількох питань з табл. 8.1 і виносяться у вигляді питань модульних контролів.