

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ: ВИБРАНІ РОЗДІЛИ

ЗБІРНИК ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ: ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН, ПАРАМЕТРИ СТАНУ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітніми програмами: «Прикладна механіка пластичності матеріалів»,
«Технологія виробництва летальних апаратів», «Автоматизовані та роботизовані
механічні системи», «Динаміка і міцність машин», «Інструментальні системи
інженерного дизайну», «Технології комп'ютерного конструювання верстатів, роботів
і машин» спеціальності 131 «Прикладна механіка»;
за освітніми програмами «Енергетичний менеджмент та енергоефективні
технології» та «Системи забезпечення споживачів електричною енергією»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
та за освітньою програмою «Енергетичний менеджмент та інжиніринг
теплоенергетичних систем» спеціальності 144 «Теплоенергетика»*

Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Основи теплотехніки: вибрані розділи. Збірник індивідуальних завдань: одиниці вимірювання фізичних величин, параметри стану [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та 144 «Теплоенергетика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Дешко В.І., М.М. Шовкалюк, О.І. Єщенко, О.Е. Максименко – Електронні текстові дані (1 файл: 1 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 4 від 07.04 2022 р.)*

за поданням Вченої ради Навчально наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту (протокол № 7 від 21.02.2022 р.)

Електронне мережне навчальне видання

ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ: ВИБРАНІ РОЗДІЛИ
ЗБІРНИК ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ:
ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН,
ПАРАМЕТРИ СТАНУ

Укладачі: *Дешко Валерій Іванович, д-р техн. наук, проф.*
Шовкалюк Марина Михайлівна, канд. техн. наук, доц.
Єщенко Олександр Іванович, канд. техн. наук, доц.
Максименко Олександра Едуардівна, асистент

Відповідальний редактор *Буяк Надія Андріївна, канд. техн. наук, ст.викл.*

Рецензент *Боженко Михайло Федорович, канд. техн. наук, доцент*
кафедри теплоенергетики НН ІАТЕ КПІ ім. Ігоря
Сікорського

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН. ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ СТАН. ПАРАМЕТРИ СТАНУ.	5
1.1 ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН	5
1.2 ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ СТАН. ПАРАМЕТРИ СТАНУ.	6
1.3 ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ СТАНУ РОБОЧОГО ТІЛА	14
1.4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ	18
1.5 РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ І ПРИКЛАДІВ	19
1.5.1 ВИЗНАЧЕННЯ АБСОЛЮТНОГО ТИСКУ	19
1.5.2 ВИЗНАЧЕННЯ АБСОЛЮТНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ	23
1.5.3 ВИЗНАЧЕННЯ ГУСТИНИ І ПИТОМОГО ОБ'ЄМУ	25
1.6 ДОМАШНІ ВАРІАНТИ ЗАВДАННЯ	27
1.7 ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ	30
2 РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ	42
2.1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ	42
2.2 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ	49
2.3 РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ І ПРИКЛАДІВ	49
2.4 ДОМАШНІ ВАРІАНТИ ЗАВДАННЯ	57
2.5 ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ	59
ЛІТЕРАТУРА	69
ДОДАТКИ	70

ВСТУП

Навчальний посібник призначено для студентів, що вивчають дисципліни «Основи теплотехніки», «Теоретичні основи теплотехніки» та «Термодинаміку» спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та 144 «Теплоенергетика».

У навчальному посібнику наведено теоретичні відомості, приклади вирішення типових задач, наведені індивідуальні варіанти завдань. Мета використання таких завдань - перевірка опанування студентами основних понять, співвідношень та методів теплотехнічних розрахунків. Приклади компонувались таким чином, щоб вони були зв'язані з інженерно-технічним фахом майбутнього спеціаліста та пояснювали роботу найпростіших теплових приладів та обладнання. Самостійна робота над опануванням теми розвиває творчі здібності студента, вчить самостійно працювати з підручниками й науковою літературою.

Для кращого засвоєння матеріалу студенту необхідно:

- вивчити конспект лекцій;
- відповісти на контрольні запитання;
- розібратися в методиці вирішення типових задач;
- самостійно виконати домашні завдання за індивідуальними варіантами;

1. ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН. ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ СТАН. ПАРАМЕТРИ СТАНУ

Матеріали, викладені у даному розділі, є основою, на якій базується викладання наступних тем; він розкриває фізичну суть та особливості цілого класу термодинамічних величин - *параметрів стану*.

1.1 Одиниці вимірювання фізичних величин

Основні одиниці фізичних величин СІ:

1. Довжина – метр [м]
2. Маса – кілограм [кг]
3. Час – секунда [с]
4. Сила електричного струму – Ампер [А]
5. Термодинамічна температура – Кельвін [К]
6. Кількість речовини – моль [моль]
7. Сила світла – кандела [кд]

Похідні одиниці

Механічні:

Сила – Ньютон [Н]
Тиск – Паскаль [Па]
Робота – Джоуль [Дж]
Потужність – Ватт [Вт]

Теплові:

Теплота – Джоуль [Дж]
Теплоємність – Джоуль на Кельвін
[Дж/К]

На практиці ще зустрічаються одиниці, які відносяться до технічної системи, яку іменують МКГСС. Назва системи складається з перших літер її основних одиниць: *метр, кілограм-сила, секунда*. Відомо, що 1 кгс – це сила, яка масі в 1 кг надає прискорення $9,81 \text{ м/с}^2$, а 1 Н – це сила, яка масі в 1 кг надає прискорення 1 м/с^2 , тому $1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н}$. Тому, значення прискорення вільного падіння $9,81 \text{ м/с}^2$ є перевідним множником при розрахунках одиниць з системи МКГСС до СІ.

Наприклад:

$$1 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \text{ Н/м}^2;$$

$$1 \text{ кгм} = 9,81 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ кгм/с} = 9,81 \text{ Вт.}$$

Історично склалось, що теплота в технічній системі одиниць вимірювалась в калоріях [кал]. Калорія – це кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання 1 кг води з 19,5 до 20,5°C. Експериментально встановлено, що для нагрівання 1 г води на 1°C необхідна кількість енергії 4,186 Дж (досвід Джоуля), тобто

$$1 \text{ кал} = 4,186 \text{ Дж} = 4,186/9,81 = 0,427 \text{ кгм.}$$

На практиці використовують одиницю, яка в 1000 разів більше – кілокалорію:

$$1 \text{ ккал} = 4,186 \text{ кДж} = 427 \text{ кгм.}$$

В електротехніці та повсякденному житті ми зустрічаємось з одиницею роботи – кіловат-година. Співвідношення між 1 кВт·год, кДж, ккал має вигляд:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3600 \text{ кДж} = 3600/4,186 = 860 \text{ ккал}$$

Кількість ват, якій відповідає одиниця теплової потужності ккал/год:

$$1 \text{ ккал/год} = 4186/3600 = 1,163 \text{ Вт}$$

1.2 Термодинамічний стан. Параметри стану

Технічна термодинаміка – наука, яка вивчає (предмет технічної термодинаміки) процеси взаємного перетворення теплоти і роботи, властивості тіл і систем, що беруть участь в цих процесах.

Об'єктами вивчення ТТД є різні термодинамічні системи (ТДС), які являють собою сукупність макроскопічних матеріальних тіл, що обмінюються енергією та/або речовиною між собою і навколишнім (зовнішнім) середовищем (НС), яке лежить поза його межами. Окреме тіло може розглядатися як ТДС.

ТДС можуть мати фізичні або уявлені межі.

Поверхня, яка відокремлює ТДС від НС, називається **контрольною**.

ТДС поділяються на **складні та прості**, останні в свою чергу на:

Закриті - немає обміну речовиною з навколишнім середовищем через контрольну поверхню ($m=\text{const}$). Наприклад, продукти згоряння двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) в процесі розширення.

Відкриті – є обмін речовиною і енергією з навколишнім середовищем через контрольну поверхню ($m\neq\text{const}$). Наприклад, процес виштовхування відпрацьованих газів в ДВЗ.

Ізольовані - не обмінюються енергією і речовиною з навколишнім середовищем ($m=\text{const}$).

Адіабатні або теплоізовані – відсутній теплообмін з навколишнім середовищем (наприклад, газ знаходиться в посудині, стінки якої вкриті ідеальною тепловою ізоляцією, що виключає теплообмін з навколишнім середовищем).

В закритій ТДС енергетичні взаємодії між частинами (або з іншими системами) обмежуються механічною роботою або теплообміном. Відкриті ТДС більш складні але основні положення термодинаміки справедливі для обох типів систем.

В теплових машинах взаємні перетворення теплоти і роботи здійснюється за допомогою *робочого тіла*. Іншими важливими для ТТД складовими ТДС можуть бути *джерела теплоти* та *об'єкти роботи*. Характерною ознакою джерела теплоти є обмін енергією з іншими елементами системи у формі теплоти, об'єкта роботи – у формі роботи.

Технічна термодинаміка в основному розглядає газоподібні або рідинні робочі тіла, що мають властивість змінювати об'єм. Газоподібні тіла, в яких діють сили зчеплення між молекулами, а самі молекули являють собою матеріальні точки, що мають об'єм, називають реальним газом.

Ідеальним називається газ, в якому відсутні сили зчеплення між

молекулами, а самі молекули являють собою матеріальні точки, що не мають об'єму. Чим нижчий тиск і вища температура, при яких знаходиться реальний газ, тим більше він наближається до ідеального.

Стан термодинамічної системи — сукупність значень деякої кількості фізичних величин, що характеризує макроскопічні фізичні властивості тіла (системи тіл) та визначає їх фізичний стан. Для різних систем ці величини та їх сукупність можуть різнитися. Фізичні величини, які однозначно визначають стан ТДС/РТ, називаються термодинамічними параметрами або функціями стану/ термодинамічними параметрами стану.

Параметри термодинамічного стану – це макроскопічні величини, які можуть бути заміряні або розраховані. Вони характеризують властивості макросистем і є середньо-статистичними величинами, які базуються на значеннях мікроеlementів, що характеризують властивості окремих часток.

Питання термодинамічного стану системи та її параметрів цікаво розглянути з точки зору термодинамічних потенціалів. Термодинамічний потенціал – це величина, зменшення якої дорівнює роботі системи, яка обернено переходить при певних умовах з одного стану в другий. Як відомо, в термодинаміці розглядають чотири потенціали:

- 1) $U = f(v, s)$ – ізохорно-ізоентропійний потенціал або внутрішня енергія;
- 2) $H = f(p, s)$ – ізобарно-ізоентропійний потенціал або ентальпія;
- 3) $F = f(v, T)$ – енергія Геймгольца або вільна енергія;
- 4) $G = f(p, T)$ – енергія Гібсса або вільна ентальпія.

Повна енергія чи ентальпія робочого тіла визначається рівнянням:

$$H = U + pV, \quad (1)$$

або для питомих величин –

$$h = u + pv, \quad (2)$$

де H, h – відповідно ентальпія та питома ентальпія робочого тіла, кДж , кДж/кг ;

p – абсолютний тиск робочого тіла, Н/м^2 ;

V, v – відповідно об'єм та питомий об'єм робочого тіла, м^3 , $\text{м}^3/\text{кг}$.

Враховуючи, що

$$U = F + TS, \quad (3)$$

$$u = f + Ts, \quad (4)$$

та

$$G = F + pV, \quad (5)$$

$$g = f + pv, \quad (6)$$

де U, u – відповідно внутрішня енергія та питома внутрішня енергія робочого тіла, кДж , кДж/кг ;

F, f – відповідно вільна енергія та питома вільна енергія робочого тіла кДж , кДж/кг ;

T – абсолютна температура, К ;

S, s – відповідно ентропія та питома ентропія, кДж/К , $\text{кДж/кг}\cdot\text{К}$;

G, g – відповідно вільна ентальпія та питома вільна ентальпія, кДж , кДж/кг .

Рівняння (1) та (2) можна записати в такому вигляді:

$$H = F + TS + pV, \quad (7)$$

$$h = f + Ts + pv. \quad (8)$$

Рівняння (7) та (8) можна представити графічно у вигляді схем:

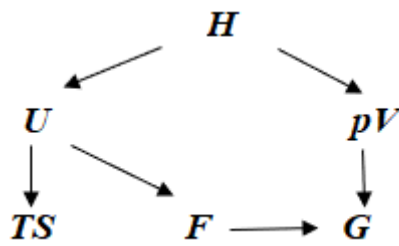


Рисунок 1

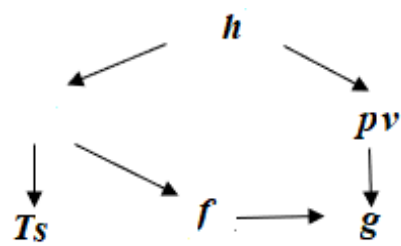


Рисунок 2

Схематичне зображення складу ентальпії називається енергетичною моделлю робочого тіла, яка має число і методичне значення. Вона наочно представляє взаємозв'язок між різними складовими частинами енергії робочого тіла, а також наочно показує, які величини визначають енергетичний рівень робочого тіла при певних умовах.

Під енергетичним рівнем робочого тіла розуміють величину та склад його енергії.

Сукупність значень різних величин, які визначають енергетичний рівень робочого тіла, має назву термодинамічний стан цього тіла.

Фізичні величини, які визначають енергетичний рівень робочого тіла, мають назву параметрів термодинамічного стану.

З рисунку 1 та 2 виходить, що енергетичний рівень робочого тіла визначається величинами: h, u, s, p, T, v , які є параметрами термодинамічного стану, а також комплексними величинами: f, g, Ts, pv , які складаються з параметрів термодинамічного стану і мають їх властивості.

Параметри термодинамічного стану – це макроскопічні величини, які можуть бути заміряні або розраховані. Вони характеризують властивості макросистем і є середньо-статистичними величинами, які базуються на значеннях мікроединиць, що характеризують властивості окремих часток.

Значення параметрів термодинамічного стану можуть залежати або не залежати від маси системи. Параметри стану, значення яких пропорційне масі системи або кількості речовини, називають екстенсивними. Наприклад, об'єм, внутрішня енергія, ентальпія, ентропія. Вони позначаються великими

буквами. Параметри стану, величини яких не залежить від маси системи або кількості речовини, називають інтенсивними. Наприклад, тиск, температура, питоми та мольні термодинамічні величини.

Питомими термодинамічними величинами називають екстенсивні параметри стану, віднесені до 1 кг речовини. Вони позначаються маленькими буквами.

Мольними термодинамічними величинами називають екстенсивні параметри стану, які віднесені до одного кіломоля речовини.

Кожному термодинамічному стану відповідає визначене значення кожного з параметрів стану. Для однозначної характеристики системи немає необхідності задавати значення всіх параметрів стану. Зміна значення хоча б одного з параметрів стану приводить до зміни самого стану.

Стани систем, з якими, як правило, мають справу в технічній термодинаміці, можуть бути визначені значеннями трьох параметрів. До них відносяться абсолютний тиск, абсолютна температура та питоми об'єм. Ці параметри називають основними (іноді термічними) параметрами стану. Але за значеннями двох з цих параметрів можна знайти значення третього. Тому термодинамічний стан системи може бути визначений за значенням будь-яких двох з вищеназваних параметрів, які називають незалежними.

Стан термодинамічної системи, відповідні параметри якої в усіх її частинах мають однакове значення та незмінні при постійних зовнішніх умовах та відсутності в системі енергетичних потоків, називаються рівноважним, або квазистатичним. Якщо в усіх частинах системи залишається постійною тільки температура, то такий стан називається термічно рівноважним станом; якщо залишається постійним тільки тиск – механічно-рівноважним станом.

Стан системи, параметри стану якої, або хоч один з них, мають різне значення в різних її частинах, називаються нерівноважним. Рівноважний стан системи може зберігатися незмінним необмежений час. Нерівноважний стан є нестійким і прямує до встановлення рівноважного стану. Вивчення

нерівноважного стану системи приводить до складних залежностей, які не можуть бути досліджені звичайними термодинамічними методами. Тому в технічній термодинаміці досліджуються рівноважні стани систем.

Оскільки рівноважний стан може бути визначений двома незалежними параметрами, то в плоскій системі координат він зображується точкою. Наприклад, при параметрах стану p , v , T можуть використовуватись плоскі системи координат pv , pT , Tv .

До загальних властивостей параметрів стану належать:

1) значення параметра для даного стану може бути визначено по відомим значенням двох інших параметрів, тобто:

$$T = f(p, v);$$

2) параметр стану є функцією стану, і при зміні стану системи значення параметрів визначаються кінцевими станами та не залежать від шляху, по якому система змінювала свій стан. Так, наприклад, якщо в системі координат pv початковий рівноважний стан термодинамічної системи визначається точкою 1 (рис.3), а кінцевий – точкою 2, то значення параметрів визначається положенням точок 1 і 2 та не залежить від того, по якій з кривих $a, b, в$ і так далі (між двома точками можна провести незчислену кількість кривих) система переходила із стану 1 у стан 2 або, навпаки, із стану 2 у стан 1.

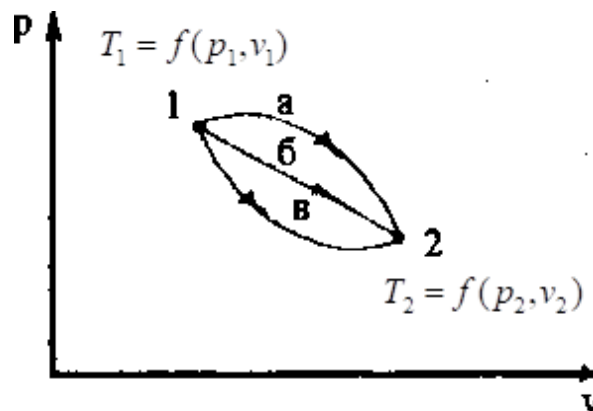


Рисунок 3

3) оскільки значення параметрів стану не залежить від шляху, по якому система змінює свій стан, то при зміні стану по кривій в процесах *a, б, в*, які здійснюються між одними і тими ж кінцевими станами газу, зміна значень параметрів стану, наприклад *T*, буде однією й тією ж, хоч характер цих процесів різний. Таким чином можна записати:

$$\Delta T_a = \Delta T_b = \Delta T_c = \Delta T = \int_{T_1}^{T_2} dT = T_2 - T_1 = f(p_2 v_2) - f(p_1 v_1)$$

У математичному аналізі доводиться, що коли значення криволінійного інтегралу не залежить від напрямку інтегрування, а визначається лише початковими та кінцевими точками інтегрування, то підінтегральний вираз – це повний диференціал. Оскільки значення криволінійного інтегралу будь-якої функції стану не залежить від шляху інтегрування, диференціал будь-якої функції стану є повним диференціалом. Тобто, наприклад, коли:

$$T = f(p, v)$$

$$dT = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v dp + \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv.$$

Індекс при похідній показує на параметр, при постійному значенні якого визначається ця похідна.

4) якщо процес замкнений, тобто якщо по завершенні його газ повертається у початковий стан, наприклад 1a2b1 рис.3, то зміна параметрів стану в ньому буде дорівнювати нулю, тобто:

$$\Delta T = \oint dT = 0,$$

$$\Delta p = \oint dp = 0,$$

$$\Delta v = \oint dv = 0.$$

В прикладах найчастіше доводиться мати справу з основними параметрами стану, які легко вимірюються або розраховуються. Інші функції стану є похідними від основних параметрів.

1.3 Основні параметри стану робочого тіла

Тиск - сила, з якою газ діє на одиницю поверхні посудини, в якій він уміщується, має назву питомий тиск або просто тиск і позначається p . Тиск газу - це наслідок ударів молекул об стінки посудини. У кожному місці поверхні тиск має напрямок по нормалі до елемента поверхні.

$$\text{В СІ одиниця тиску має назву Паскаль: } \left[\frac{H}{m^2} \right] = \left[\frac{кг}{m/c^2} \right] = [Pa]$$

Ньютон на квадратний метр - рівномірно розподілений тиск, при якому на $1 m^2$ діє нормально до поверхні сила, яка дорівнює 1 Н. Для практичного вживання одиниця тиску $1 \left[\frac{H}{m^2} \right]$ дуже мала. Тому в техніці тиск вимірюється у мегапаскалях [МПа]:

$$1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па.}$$

Позасистемною одиницею тиску є ще бар:

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па.}$$

В технічній системі одиниця тиску є кілограм-сила на квадратний метр $\left[\frac{кгс}{m^2} \right]$.

Позасистемні одиниці виміру:

міліметр водяного стовпа [мм вод. ст.], $1 \text{ мм. вод. ст.} = 9,80665 \text{ Па}$,

міліметр ртутного стовпа [мм рт. ст.], $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}$;

$1 \text{ кгс/см}^2 = 10^4 \text{ мм вод. ст.} = 98066,5 \text{ Па} = 0,981 \text{ бар} = 735,1 \text{ мм.рт.ст.}$;

$1 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \text{ Н/м}^2$;

$1 \text{ бар} = 1,0197 \text{ кгс/см}^2 = 750,1 \text{ мм.рт.ст.}$

Тиск навколишнього середовища або атмосферний тиск вимірюють барометром. Якщо у посудині тиск більший ніж атмосферний, то його вимірюють манометром; якщо тиск у посудині менший за атмосферний - то його заміряють вакуумметром.

Розрізняють:

- тиск абсолютний (тиск у посудині);
- манометричний, або надлишковий;
- вакуумметричний або розрідження;
- барометричний або атмосферний.

На рисунку 4 наведена схема рідинного манометра, який приєднується до посудини. Рідина в U-подібній трубці знаходиться з одного боку під дією абсолютного тиску газу $P_{абс}$ в посудині, а з іншого боку – під дією тиску $P_{бар}$ зовнішнього середовища (атмосферний).

Абсолютний тиск газу $P_{абс}$ дорівнює сумі атмосферного (барометричного) і надлишкового тиску:

$$P_{абс} = P_{бар} + P_{надл} \quad (9)$$

Надлишковий тиск газу $P_{абс}$ дорівнює різниці між абсолютним і барометричним тиском:

$$P_{надл} = P_{абс} - P_{бар} \quad (10)$$

деяких випадках тиск у посудині може бути менший атмосферного (рисунок 4).

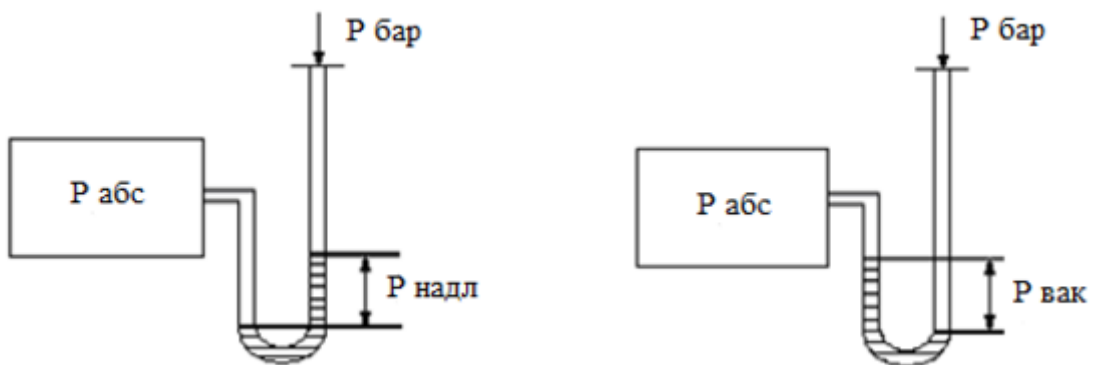


Рисунок 4

Різниця між барометричним і абсолютним тиском має назву **розрідження або вакуум**.

$$P_{\text{бар}} = P_{\text{абс}} + P_{\text{вак}} \quad (11)$$

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{бар}} - P_{\text{вак}} \quad (12)$$

$$P_{\text{вак}} = P_{\text{бар}} - P_{\text{абс}} \quad (13)$$

Параметром термодинамічного стану робочого тіла є абсолютний тиск, який виражений в Н/м².

Температура – міра нагрітості тіла і є величиною, яка визначає направлення довільного переходу теплоти. В СІ температура вимірюється в так званій термодинамічній або абсолютній шкалі, яка була запропонована англійським фізиком Кельвіном у 1848 році. Температура, яка вимірюється цією шкалою, має назву термодинамічної або абсолютної температури і позначається T . Одиницею вимірювання термодинамічної температури є Кельвін [K]. Згідно з молекулярно-кінетичною теорією газів абсолютна температура пропорційна середній кінетичній енергії поступального руху молекул. Цей зв'язок визначається виразом:

$$\frac{2}{3} n \frac{mW^2}{2} = RT \quad (14)$$

де m - маса молекули, кг;

W - середня швидкість поступального руху молекули, м/с;

R - питома стала газів, Дж/(кг·К).

Цей вираз показує, що абсолютна температура завжди додатня, оскільки при температурі абсолютного нуля ($T=0$) хаотичний рух молекул припиняється. Таким чином абсолютний нуль температури недосяжний.

У техніці температура вимірюється градусами міжнародної 100-градусної шкали Цельсія (°C - градус Цельсія), 0°, який відповідає температурі плавлення льоду, а 100°C - температурі кипіння води при тиску 760 мм рт.ст. і позначається t . Для СІ ця шкала не є системною.

В абсолютній шкалі відстань між постійними точками (плавлення льоду і кипіння води) також розділена на 100 частин, як і в міжнародній 100-

градусній шкалі, а нуль шкали (абсолютний нуль) перенесено на 273 поділки нижче температури плавлення льоду.

Між абсолютною температурою і температурою по 100-градусній шкалі існує залежність:

$$T = t + 273 \quad (15)$$

Оскільки величина поділки, яка відповідає одиниці температури по шкалі Кельвіна і шкалі Цельсія однакова, то різниці температур (числові значення) по шкалі Кельвіна і шкалі Цельсія однакові, таким чином:

$$\Delta T [K] = \Delta t [^{\circ}C] \quad (16)$$

Отже, параметром термодинамічного стану є абсолютна температура.

Питомий об'єм - об'єм одиниці маси речовини. Ця величина позначається літерою – v і має одиницю вимірювання $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$v = \frac{V}{m} \quad (17)$$

Добуток питомого об'єму та густини дорівнює одиниці, тобто це взаємообернені величини:

$$v \cdot \rho = 1 \quad (18)$$

1.4 Контрольні питання

1. Що вивчає технічна термодинаміка?
2. Які методи дослідження використовує ця інженерна наука?
3. Що таке термодинамічна система? Наведіть приклади закритої, відкритої, адіабатної та енергетично ізольованої термодинамічної системи.
4. Як називають величини, які характеризують стан термодинамічної системи?
5. З'ясуйте поняття рівноважного та нерівноважного стану термодинамічної системи.
6. Що таке абсолютний тиск?
7. Чим надлишковий тиск відрізняється від вакууметричного тиску або розрідження? Як називаються приклади для вимірювання цих величин?
8. Наведіть розрахункові формули для визначення абсолютного тиску. Які одиниці вимірювання має цей параметр стану?
9. Що таке абсолютна температура, її фізичний зміст, одиниці?
10. Питомий об'єм, його зв'язок з густиною речовини.
11. Властивості термодинамічних параметрів стану.

1.5 Приклади розв'язання типових задач

Задачі компонується за розділами: визначення абсолютного тиску; знаходження абсолютної температури; вирахування питомого об'єму та густини; задачі підвищеного ступеня складності, що потребують знань з математики, механіки, гідростатики і таке інше.

1.5.1 Визначення абсолютного тиску

Задача 1.1

Надлишковий тиск пари в теплообміннику дорівнює 0,5 МПа при барометричному тиску 725 мм рт ст. Чому буде дорівнювати надлишковий тиск в апараті, якщо покази барометра підвищаться до 785 мм рт ст, а стан пари в теплообміннику залишиться попереднім? Відповідь виразити в мегапаскалях (МПа).

Дано:

$$p_{1\text{надл}} = 0,5 \text{ МПа}$$

$$p_{1\text{бар}} = 725 \text{ мм рт ст}$$

$$p_{2\text{бар}} = 785 \text{ мм рт ст}$$

Знайти:

$$p_{2\text{надл}} - ?$$

Розв'язок:

Визначимо абсолютний тиск пари:

$$p = p_{1\text{бар}} + p_{1\text{надл}} = \frac{725}{750 \cdot 10} + 0,5 = 0,5967 \text{ МПа}$$

Визначимо надлишковий тиск у випадку зміни барометричного тиску:

$$p_{2\text{надл}} = p + p_{2\text{бар}} = 0,5967 - \frac{785}{750 \cdot 10} = 0,4921 \text{ МПа}$$

Відповідь: 0,4921 МПа.

Задача 1.2.

У циліндрі з рухомим поршнем міститься газ. Щоб утримати поршень у рівновазі, на нього необхідно встановити гирю, що створює силу 200 Н. Площина поперечного перерізу поршня $f = 0,01 \text{ м}^2$. Який абсолютний тиск у циліндрі, якщо барометричний тиск дорівнює 100 кН/м^2 ?

Дано:

$$F_{\text{над}} = 200 \text{ Н}$$

$$f = 0,01 \text{ м}^2$$

$$p_{\text{бар}} = 100 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

Знайти:

$$p - ?$$

Відповідь: 120 кПа.

Розв'язання:

Розрахуємо надлишковий тиск, що створюється силою ваги гирі:

$$p_{\text{надл}} = \frac{F_{\text{надл}}}{f} = \frac{200}{0,1} = 2 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 20 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

Знайдемо абсолютний тиск газу під поршнем:

$$p = p_{\text{бар}} + p_{\text{надл}} = 100 + 20 = 120 \text{ кПа}$$

Задача 1.3.

Розрідження в димоході парового котла вимірюється тягоміром з кутом нахилу трубки до горизонту, що дорівнює 30° . Довжина стовпчика води, що відрховується по шкалі тягоміра, дорівнює 180 мм. Визначити абсолютний тиск газу (МПа, барах), якщо показ барометра дорівнює 750 мм рт.ст.

Дано:

$$l = 189 \text{ мм вод ст}$$

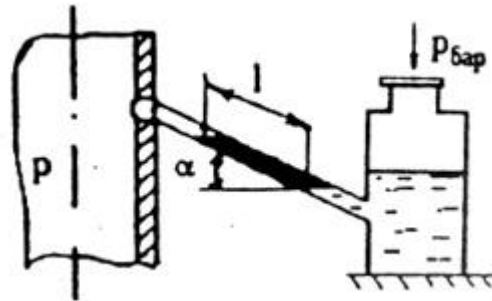
$$\alpha = 30^\circ$$

$$p_{\text{бар}} = 750 \text{ мм рт ст}$$

Знайти:

$$p - ?$$

Розв'язання:



Вакууметричний тиск вимірюється висотою стовпа рідини:

$$p_{\text{вак}} = l \cdot \sin \alpha = 180 \cdot \frac{1}{2} = 90 \text{ мм вод ст}$$

Абсолютний тиск:

$$p = p_{\text{бар}} - p_{\text{вак}} = 750 - \frac{90}{13,6} = 743,88 \text{ мм рт ст} / 750 = 0,991 \text{ бар} = 0,0991 \text{ МПа}$$

Відповідь: 0,0991 МПа.

Задача 1.4.

При витіканні повітря з балону манометричний тиск змінюється з 0,5 МПа до 0,5 бар. Барометричний тиск дорівнює 745 мм рт ст. З'ясувати, у скільки разів зменшився абсолютний тиск повітря в балоні.

Дано:

$$p_{1\text{надл}} = 5 \text{ МПа}$$

$$p_{2\text{над}} = 0,5 \text{ бар}$$

$$p_{\text{бар}} = 745 \text{ мм рт ст}$$

Знайти:

$$\frac{p_1}{p_2} - ?$$

Розв'язання:

Визначимо абсолютний тиск повітря на початку і в кінці витікання рідини з балона:

$$p_1 = p_{\text{бар}} + p_{1\text{надл}} = \frac{745}{750 \cdot 10} + 5 = 5,099 \text{ МПа}$$

$$p_2 = p_{\text{бар}} + p_{2\text{надл}} = 0,099 + 0,05 = 0,149 \text{ МПа}$$

$$\text{Тоді, } \frac{p_1}{p_2} = \frac{5,099}{0,149} = 34,22 \text{ рази}$$

Відповідь: 0,0991 МПа.

Задача 1.5.

Визначити, у скільки разів зміниться тиск пари, якщо відомі показання манометра на вході в турбіну і вакуумметра на виході із турбіни.

Дано:

$$p_{1\text{ман}} = p_{1\text{бар}} = 10 \text{ МПа}$$

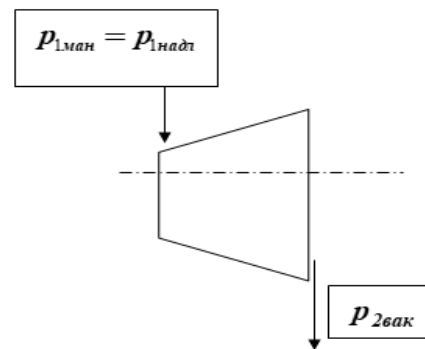
$$p_{2\text{вак}} = 96 \text{ кПа}$$

$$p_{\text{бар}} = 100 \text{ кПа} = 0,1 \text{ МПа}$$

Знайти:

$$\frac{p_1}{p_2} - ?$$

Розв'язання:



Абсолютний тиск пари на вході в турбіну $p_{\text{абс}} \succ p_{\text{бар}}$

$$p_1 = p_{1\text{абс}} = p_{\text{бар}} + p_{\text{надл}} = 0,1 + 10 = 10,1 \text{ МПа} = 10,1 \cdot 10^3 \text{ кПа}$$

Абсолютний тиск пари на виході із турбіни $p_{\text{абс}} \prec p_{\text{бар}}$

$$p_2 = p_{2\text{абс}} = p_{\text{бар}} - p_{2\text{вак}} = 100 - 96 = 4 \text{ кПа}$$

$$\text{Тоді, } \frac{p_1}{p_2} = \frac{10,1 \cdot 10^3}{4} = 2525 \text{ раз}$$

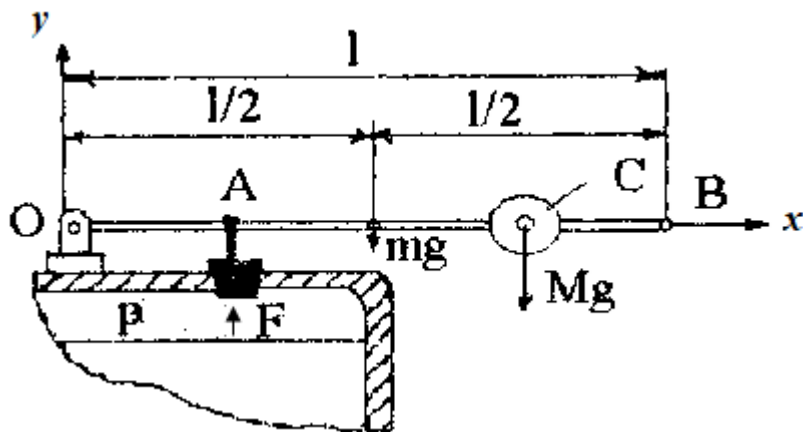
Відповідь: 2525 раз

Задача 1.6.

Захисні клапани парового котла повинні відкриватися при тиску p . Площа отвору, що закривається клапаном дорівнює s . На якій відстані від осі обертання треба розмістити вагу з центром в точці C масою M , для того, щоб клапан не відкривався, якщо горизонтальний стержень має масу m та довжину $OB=l$, а $OA=0,25 \cdot l$?

Розв'язання

Для того, щоб клапан не відкрився, необхідно, щоб система, що складається зі стержня масою m , захисного клапану та ваги M , знаходилася в рівновазі. З механіки відомо, що тіла, які мають вісь обертання, знаходяться в рівновазі, якщо сума проєкцій усіх сил, що діють на тіло, на будь-яку координатну вісь дорівнює нулю і сума моментів цих сил навколо осі обертання також дорівнює нулю. Вибираємо систему так, як показано на малюнку.



$$\text{Тоді, } \sum_{i=1}^n F_{iy} = 0; \sum_{i=1}^n M_i = 0.$$

Запишемо рівняння проєкцій сил на вертикальну вісь та рівняння моментів:

$$\left. \begin{aligned} ps \cdot mg \cdot Mg &= 0 \\ ps \cdot 0,25 \cdot l \cdot mg \cdot 0,5 \cdot Mg \cdot OC &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ а)}$$

Розв'яжемо останнє рівняння відносно розміру OC , що нас цікавить:

$$OC = \frac{ps \cdot 0,25 \cdot l \cdot mg \cdot 0,5}{Mg} \quad \text{б)}$$

Підставимо значення ps з (а) в (б). Тоді одержимо:

$$OC = \frac{g \cdot (m + M) \cdot 0,25 \cdot l - mg \cdot 0,5 \cdot l}{Mg} = \frac{0,25 \cdot l \cdot (M - m)}{M}$$

Відповідь: $OC = \frac{0,25 \cdot l \cdot (M - m)}{M}$

1.5.2 Визначення абсолютної температури

Задача 1.7

Для визначення теплоємності газу c можна використати вираз: $c = a + b \cdot t$, де a і b – постійні коефіцієнти; t – температура, °С. Написати цей вираз, використовуючи поняття абсолютної температури.

Розв'язання

$$T, K = t^{\circ}C + 273$$

$$t^{\circ}C = T, K - 273 = T - 273$$

$$c = a + b \cdot (T - 273),$$

або, якщо розкрити дужки, отримаємо:

$$c = a + b \cdot T - b \cdot 273 = (a - b \cdot 273) + b \cdot T$$

Відповідь: $c = (a - b \cdot 273) + b \cdot T$

Задача 1.8

Знаючи співвідношення між абсолютною температурною шкалою і 100-градусною шкалою Цельсія, вказати, скільком Кельвінам відповідають 0 та 100 °С?

Виразити температуру абсолютного нуля в градусах Цельсія.

Розв'язання

$$0^{\circ}C = 273K$$

$$100^{\circ}C = 373K$$

$$0K = 273^{\circ}C$$

Відповідь: 273K, 373K, 273 °С

Задача 1.9

Температура пари після проходження її через пароперегрівник збільшилась на 150°C . Чому дорівнює збільшення температури в Кельвінах? Якою буде температура пари на виході з пароперегрівника в кельвінах, якщо на вході температура робочого середовища складала 1000°C ?

Дано: **Розв'язання**

$$\Delta t = 150^{\circ}\text{C} \quad \Delta t, ^{\circ}\text{C} = \Delta T, \text{K} = 150\text{K}$$

$$t_1 = 1000^{\circ}\text{C} \quad T_1 = t_1 + 273 = 1000 + 273 = 1273\text{K}$$

Знайти: $T_2 = T_1 + \Delta T = 1273 + 150 = 1423\text{K}$

$$\Delta T, \text{K} - ?$$

$$T_2 - ?$$

Відповідь: 150K, 1423K

Задача 1.10

Співвідношення між температурою за шкалою Фаренгейта та температурою в градусах Цельсія має вигляд:

$$t, ^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32$$

З'ясувати, чи є температура, числове значення якої в градусах Цельсія і градусах Фаренгейта співпадає.

Розв'язання

Запишемо два рівняння. Одне, яке витікає з умови задачі, а друге – одержимо на підставі формули співвідношення температурних шкал:

$$\left. \begin{aligned} x = t^{\circ}\text{C} = t^{\circ}\text{F} \\ t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} \cdot (t^{\circ}\text{F} - 32) \end{aligned} \right\}$$

Методом підстановки розв'яжемо систему рівнянь відносно x .

Одержимо, $x = \frac{5}{9} \cdot (x - 32)$, або

$$x - \frac{5}{9} \cdot x = -\frac{5 \cdot 32}{9}$$

$$\frac{4}{9x} = -\frac{5 \cdot 32}{9}$$

$$x = -\frac{160}{4} = -40$$

Відповідь: чисельно співпадають $t = -40^{\circ}\text{C}$ та $t = -40^{\circ}\text{F}$

1.5.3 Визначення густини і питомого об'єму

Задача 1.11

У посудині об'ємом 256 л знаходиться 0,136 кг газу при розрідженні 420 мм рт ст. Визначити абсолютний тиск у посудині, питомий об'єм та густину газу. Барометричний тиск дорівнює 740 мм рт ст.

Дано:

Розв'язок:

$$V = 256 \text{ л} = 0,256 \text{ м}^3$$

$$P = p_{\text{бар}} - p_{\text{вак}} = 740 - 420 = 320 \text{ мм рт ст}$$

$$p_{\text{бар}} = 740 \text{ мм рт ст}$$

$$p = \frac{320}{750 \cdot 10} = 0,0427 \text{ МПа}$$

$$m = 0,136 \text{ кг}$$

$$p_{\text{вак}} = 420 \text{ мм рт ст}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0,136}{0,256} = 0,531 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Знайти:

$$p, \rho, \nu - ?$$

$$\nu = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0,531} = 1,883 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Відповідь: 0,0427 МПа, 0,531 кг/м³, 1,883 м³/кг.

Моль (грам-молекула) – кількість речовини в грамах, що чисельно дорівнює відносній молекулярній масі даної речовини. У нормальних умовах моль ідеального газу займає об'єм 22,4 л (*Н.у.:* 760 мм рт ст і температура 0°C).

Кіломоль (кілограм-молекула) – кількість речовини в кілограмах, що чисельно дорівнює відносній молекулярній масі даної речовини. У нормальних умовах кіломоль ідеального газу займає об'єм 22,4 м³.

Задача 1.12

Вважаючи кисень ідеальним газом, знайти густину і питомий об'єм при нормальних умовах.

Дано:

Розв'язок:

$$\mu_{O_2} = 32 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \quad V_{н.у.} = \frac{\mu V_{н.у.}}{\mu_{O_2}} = \frac{22,4}{32} = 0,7 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$
$$\mu V_{н.у.} = 22,4 \frac{\text{м}^3}{\text{кмоль}} \quad \rho_{н.у.} = \frac{1}{V_{н.у.}} = \frac{1}{0,7} = 1,43 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Знайти:

$$\rho_{н.у.}, V_{н.у.} - ?$$

Відповідь: 1,43 кг/м³; 0,7 м³/кг.

Задача 1.13

Порівняти два стани робочого тіла, які визначаються такими параметрами:

перший стан – $p_1=8,3$ МПа; $v_1=0,06$ м³/кг;

другий стан – $p_2=2567$ мм рт ст; $V_2=0,6$ м³/кг; $m=10$ кг.

Дано:

Розв'язок:

$$1. \begin{cases} p_1 = 8,3 \text{ МПа} \\ v_1 = 0,06 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \end{cases} \quad v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{0,6}{10} = 0,06 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$
$$2. \begin{cases} p_2 = 2567 \text{ мм рт ст} \\ V_2 = 0,6 \text{ м}^3 \\ m = 10 \text{ кг} \end{cases} \quad p_2 = \frac{2567}{750} = 3,422 \text{ бар} = 0,34 \text{ Па}$$
$$v_1 = v_2$$
$$p_1 \neq p_2$$

Знайти: $p_1 \geq p_2, v_1 \geq v_2 - ?$

Відповідь: маємо різні термодинамічні стани речовини

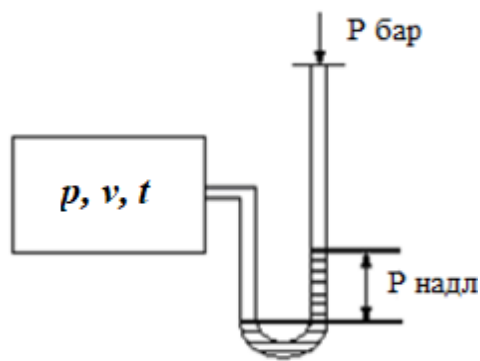
1.6 Домашні варіанти завдання

Виконуючи домашні завдання студент повинен дотримуватись наступної методики:

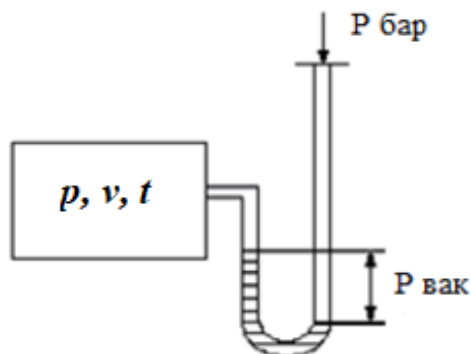
- 1) повністю переписати умову завдання;
- 2) стисло записати умову і чітко визначити, що подається в умові і що треба визначити;
- 3) рішення завдання супроводжується короткими поясненнями і малюнками;
- 4) відповідь підкреслюється і подається в системі СІ.

ЗАВДАННЯ Д-1.

Визначити абсолютний тиск, абсолютну температуру, питомий об'єм та густину газу, який заповнює посудину, якщо барометричний тиск атмосферного повітря дорівнює 745 мм рт ст. Надлишковий тиск (а) або розрідження (б) фіксуються U-подібною трубкою, яка встановлена на посудині.



а)



б)

Вид малюнка (а або б), значення маси газу, об'єм та температура визначаються за *таблицею початкових величин 1* відповідно до порядкового номера студента в академічній групі.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані

Варіант	Рисунок	Величини				
		$P_{надл.}$ мм рт ст	$P_{вак.}$ мм рт ст	$V, л$	$m, кг$	$t, °C$
1	б	-	150	360	0,331	27
2	б	-	170	400	0,214	227
3	б	-	200	500	0,315	127
4	б	-	250	750	0,287	327
5	б	-	300	600	0,177	427
6	б	-	320	300	0,197	27
7	б	-	350	200	0,092	127
8	б	-	400	400	0,128	227
9	б	-	420	370	0,093	327
10	б	-	450	350	0,067	427
11	б	-	500	300	0,114	27
12	б	-	520	420	0,114	31
13	б	-	550	700	0,220	15
14	б	-	570	400	0,115	10
15	б	-	600	450	0,108	7
16	а	150	-	360	0,495	29
17	а	170	-	400	0,395	157
18	а	200	-	500	0,523	147
19	а	250	-	750	0,910	108
20	а	300	-	600	0,890	57
21	а	320	-	300	0,442	63
22	а	350	-	200	0,344	23
23	а	400	-	400	0,371	300
24	а	420	-	370	0,510	120
25	а	450	-	350	0,647	15
26	а	500	-	300	0,420	140
27	а	520	-	420	0,506	215
28	а	550	-	700	0,726	307
29	а	570	-	400	0,690	81
30	а	600	-	450	0,630	173

ЗАВДАННЯ Д-2.

Газ стискається в компресорі. В окремі моменти часу тиск робочого тіла дорівнює p_1, p_2, p_3 . Необхідно виразити найбільше значення тиску в МПа, а найменше – в мм рт ст. Початкові величини визначаються за *таблицею початкових величин 2* відповідно до порядкового номера студента в академічній групі.

Таблиця 1.2 – Вихідні дані

Варіант	$P_1, \text{кгс/м}^2$	$P_2, \text{бар}$	$P_3, \text{кгс/см}^2$
1	$4 \cdot 10^3$	0,6	0,8
2	$5 \cdot 10^3$	2,0	0,2
3	600	0,01	2,5
4	8000	0,08	0,2
5	$7 \cdot 10^3$	3,0	0,9
6	250	0,04	0,1
7	$3 \cdot 10^4$	10,0	5,0
8	$6 \cdot 10^5$	8,0	1,0
9	15000	0,5	0,1
10	$4 \cdot 10^2$	0,7	2,0
11	6000	4,0	10,0
12	150	0,03	0,85
13	$10 \cdot 10^4$	5,0	7,2
14	750	1,0	0,9
15	$2 \cdot 10^5$	1,2	0,7

ЗАВДАННЯ Д-3.

Розрідження в конденсаторі парової турбіни дорівнює x -% від абсолютного тиску. З'ясувати значення абсолютного тиску в конденсаторі, якщо барометричний тиск сягає $P_{\text{бар}}, \text{кПа}$.

Таблиця 1.3 – Вихідні дані

Варіант	$x, \%$	$P_{\text{бар}}, \text{кПа}$
1	94	97
2	85	100
3	76	98
4	73	99
5	92	110

6	6	95
7	89	100
8	95	88
9	67	98
10	96	105
11	75	81
12	84	96
13	70	90
14	80	100
15	92	92

1.7 Індивідуальні завдання

Засвоєння матеріалу студентами контролюється виконанням тестів для самостійної роботи. Після одержання тесту студент повинен записати: назву теми; номер варіанта, своє прізвище та шифр групи. Тест містить п'ять задач. Виконуючи завдання, студент коротко записує умову задачі, наводить докладні пояснення і розрахунки, записує відповідь тільки в системі СІ. Відповідь обов'язково підкреслюється.

Варіант 1.

1. Навести співвідношення між одиницями тиску:

$$1 \text{ ат} = \dots \text{ кгс/см}^2 = \dots \text{ кгс/м}^2 = \dots \text{ Па} = \dots \text{ МПа}.$$

2. Надлишковий тиск в теплообмінному апараті дорівнює 3,2 МПа при барометричному тиску 725 мм рт ст. Яким стане надлишковий тиск у апараті, якщо барометричний тиск зміниться до 785 мм рт ст., а стан пари лишиться таким, як і раніше.

3. У парогенераторі температура пари змінюється від 590 до 1890°C. Визначити значення початкової та кінцевої температур у кельвінах, та перепад температур у парогенераторі в шкалі Цельсія та Кельвіна.

4. У ємкості 300 л знаходиться 0,15 кг газу при розрідженні 500 мм рт ст. Знайти абсолютний тиск газу, питомий об'єм та густину, якщо

барометричний тиск складає 745 мм рт ст.

5. До якого рівня A треба налити рідину в посудину циліндричної форми, радіусом R для того, щоб сила P , з якою рідина натискає на бокову поверхню посудини, дорівнювала б силі тиску на днище посудини?

Варіант 2.

1. Визначити співвідношення між одиницями тиску:

$$0,5\text{МПа} = \dots \text{кПа} = \dots \text{бар} = \dots \text{мм рт.ст.}$$

2. У циліндрі з рухомим поршнем знаходиться газ. Для рівноваги поршня на нього покладено гирю, яка тисне на поршень з силою 100 Н. Площа поперечного перерізу поршня $0,01 \text{ м}^2$. Який абсолютний тиск газу, якщо барометричний тиск 100 кН/м^2 ?

3. Для перевірки термометрів використовуються добре відомі температури плавлення, кипіння та сублімації речовин. Наприклад:

температура кипіння O_2 -183°C ;

температура сублімації S $-78,52^\circ\text{C}$;

температура плавлення Pt $+1764^\circ\text{C}$.

Визначити ці температури в абсолютній температурній шкалі.

4. Один кіломоляр газу при нормальних умовах мав густину $0,804 \text{ кг/м}^3$. Який це газ?

5. Барометричний тиск замірюється барометричною трубкою, яка встановлена вертикально. У скільки разів треба збільшити довжину трубки 1, якщо вона встановлена під кутом 30° до горизонту. Атмосферний тиск в обох випадках лишається незмінним.

Варіант 3.

1. Знайти співвідношення між одиницями теплоти і роботи

$$1 \text{ ккал} = \dots \text{кДж} = \dots \text{Дж} = \dots \text{МДж};$$

$$1 \text{ кВтч} = \dots \text{кДж} = \dots \text{Дж} = \dots \text{МДж} = \dots \text{ккал.}$$

2. У скільки разів зменшиться тиск пари, яка проходить через турбіну, якщо перед турбіною надлишковий тиск дорівнює $8,95 \text{ МПа}$, а після турбіни

розрідження становить 720 мм рт ст. Барометричний тиск прийняти 1,01 бар.

3. Для визначення теплоємності газу можна використовувати формулу $c = a + bt$, де a, b - постійні коефіцієнти; t - температура в градусах Цельсія. Написати, якого вигляду набуде ця формула, якщо замість t буде використовуватись температура в кельвінах.

4. Обчислити густину та питомий об'єм водню при нормальних умовах.

5. У циліндричну посудину налита однакова кількість по масі ртуті та води. Загальна висота стовпчика рідин у посудині $H=143$ см. Визначити тиск на днище посудини ($\rho_{\text{ртуті}}=13,6 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{\text{води}}=10^3$ кг/м³).

Варіант 4.

1. У рівнянні заповнити пропуски числовими значеннями величин.

$$0,6 \text{ МПа} = \dots \text{ кПа} = \dots \text{ Па} = \dots \text{ мм рт.ст.}$$

2. Для попередження випаровування ртуті з трубки ртутного манометра над рівнем ртуті наливають невелику кількість води. Визначити абсолютний тиск у апараті, якщо висота стовпчика ртуті дорівнює 537 мм, а висота стовпчика води над нею – 165 мм вод ст. Барометричний тиск становить 763 мм рт ст.

3. Враховуючи співвідношення між температурними шкалами Кельвіна і Цельсія, встановити яким числовим значенням у кельвінах відповідають 0 та 100°C. Виразити температуру абсолютного нуля в градусах Цельсія.

4. Порівняти два стани робочого тіла, які визначаються такими параметрами: перший стан – $p_1=0,15$ МПа; $\rho_1=0,75$ кг/м³; другий стан – $p_2=1125$ мм рт ст; $V_2=6$ м³; $m=4,5$ кг.

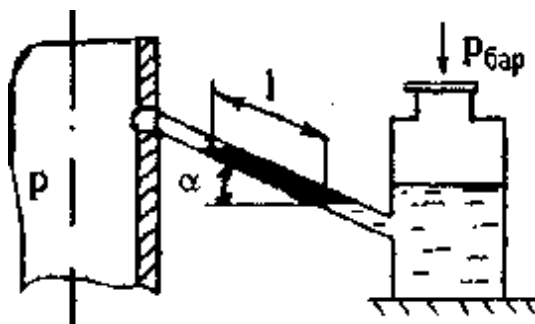
5. Циліндрична посудина масою 10 кг накривається кришкою. При викачуванні повітря з посудини кришка притискується до стінок посудини атмосферним тиском. Розрідження усередині системи дорівнює 50 мм рт ст. Якою повинна бути маса грузу, який треба підвісити до посудини, щоб відірвати посудину від кришки? Площа днища посудини становить 80 см².

Варіант 5.

1. Визначити співвідношення між одиницями енергії

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{год} = \dots \text{ кДж} = \dots \text{ МДж} = \dots \text{ ккал}$$

2. Розрідження в апараті вимірюється тягоміром з кутом нахилу трубки до горизонту 30° .



Довжина стовпчика води за шкалою тягоміра дорівнює 160 мм вод ст. Знайти абсолютний тиск в апараті, якщо барометричний тиск 745 мм рт ст.

3. Яка температура вища: 5°C чи 250 K ? Визначити температурний інтервал $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ в Кельвінах?

4. У ємкості 500 л знаходиться 0,368 кг газу при надлишковому тиску 0,76 бар. Обчислити абсолютний тиск, густину та питомий об'єм газу, якщо барометричний тиск атмосферного повітря 750 мм рт ст.

5. На яку максимальну висоту підніметься ртуть у трубці барометра, якщо атмосферний тиск дорівнює $0,93 \cdot 10^5 \text{ Па}$?

Варіант 6

1. Скільки мм рт ст складає:

$$1 \text{ ат} = \dots;$$

$$1 \text{ бар} = \dots;$$

$$p_{\text{н.у.}} = \dots?$$

2. На рухомий поршень діаметром 0,4 м встановлено груз, вага якого

дорівнює 635000 Н. Завдяки грузові газ у циліндрі не розширюється і поршень не рухається. Обчислити абсолютний тиск газу, якщо барометричний тиск 745 мм рт ст.

3. Найважливішою характеристикою робочих тіл є критична температура. Для кисню, повітря та аміаку ця температура відповідно складає: -118,1; -140,7; +132,4°C. Знайти значення критичних температур у кельвінах.

4. У ємкості 400 л знаходиться 0,4 кг газу при розрідженні 400 мм рт ст. Встановити абсолютний тиск газу, густину та питомий об'єм, якщо барометричний тиск складає 745 мм рт ст.

5. Одна з двох пляшок налита водою, друга - ртуттю. Чи потоне пляшка з водою, якщо її опустити у воду? Чи потоне пляшка із ртуттю, якщо її опустити в ртуть?

Варіант 7

1. Визначити співвідношення між одиницями потужності:

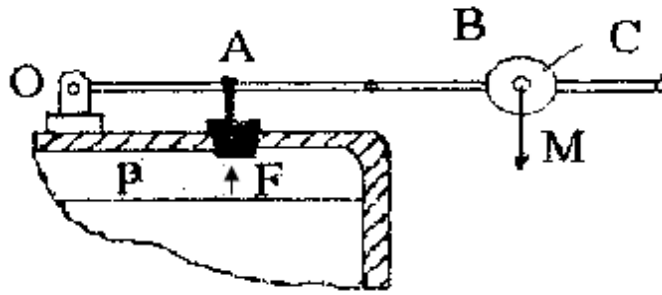
$$1 \text{ ккал/год} = \dots \text{ Вт}$$

2. Ртутний вакуумметр, який з'єднано з посудиною, фіксує розрідження 420 мм рт ст. Тиск атмосферного повітря 99 кПа. Розрахувати абсолютний тиск у посудині в мегапаскалях, барах, кілопаскалях.

3. Яка температура нижча: -125°C чи 78 К? Виразити температурний інтервал $\Delta t = 78^\circ\text{C}$ у кельвінах.

4. Один кіломоль газу при нормальних умовах має густину 1,43 кг/м³. Який це газ?

5. Захисний клапан парового котла повинен відкриватися при тиску p . Площа отвору, що закривається клапаном дорівнює s .



На якій відстані від осі обертання треба розмістити вагу з центром в точці С масою M , для того, щоб клапан не відкривався? Горизонтальний стержень має масу m та довжину $OB=1$, а $OA=0,25 \cdot l$?

Варіант 8

1. У рівнянні заповнити пропуски числовими значеннями величин:

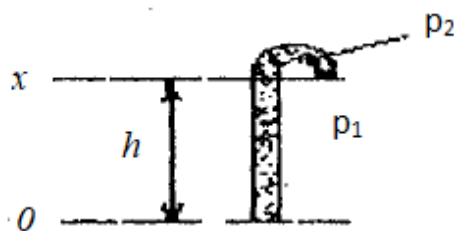
$$0,1 \text{ МПа} = \dots \text{ Па} = \dots \text{ кПа} = \dots \text{ бар} = \dots \text{ мм рт ст.}$$

2. Манометр, який розташований на ресивері зі стиснутим повітрям, фіксує $1,5 \text{ МПа}$. Барометричний тиск 740 мм рт ст . Визначити абсолютний тиск повітря в ресивері.

3. Якими будуть температури абсолютного нуля, потрійної точки та точки кипіння води при нормальному атмосферному тиску в кельвінах?

4. Знайти густину і питомий об'єм вуглекислого газу при нормальних умовах?

5. Трубка, довге коліно якої відкрите, заповнена воднем. Куди буде вигнута гумова плівка, яка закриває коротке коліно (усередину або зовні)?



Варіант 9

1. Визначити співвідношення між одиницями енергії:

$$1 \text{ ккал} = \dots \text{ кДж} = \dots \text{ Дж} = \dots \text{ МДж.}$$

2. Ртутний вакуумметр, який з'єднується з конденсатором, показує розрідження 512,5 мм рт ст. Атмосферний тиск по барометру 729 мм рт ст. Знайти абсолютний тиск у конденсаторі.

3. Для визначення теплоємності газу можна використовувати формулу $c = a + bt$, де a, b - постійні коефіцієнти; t - температура в градусах Цельсія. Написати, якого вигляду набуде ця формула, якщо замість t буде використовуватись температура в кельвінах.

4. З'ясувати, однакові чи ні термодинамічні стани робочого тіла, які характеризуються такими значеннями параметрів: *перший стан*: $t = 15^\circ\text{C}$, $v_1 = 0,25 \text{ м}^3/\text{кг}$; *другий стан*: $T_2 = 293\text{K}$, $V_2 = 8 \text{ м}^3$, $m = 10\text{кг}$.

5. У циліндричну ємкість налита вода, яка займає об'єм $V = 12 \text{ л}$. Який тиск води на стінку ємкості на висоті 10 см від днища? Густина води дорівнює 10^3 кг/м^3 .

Варіант 10

1. Знайти співвідношення між одиницями роботи:

$$1\text{кВт}\cdot\text{год} = \dots \text{Дж} = \dots \text{кДж} = \dots \text{ккал}.$$

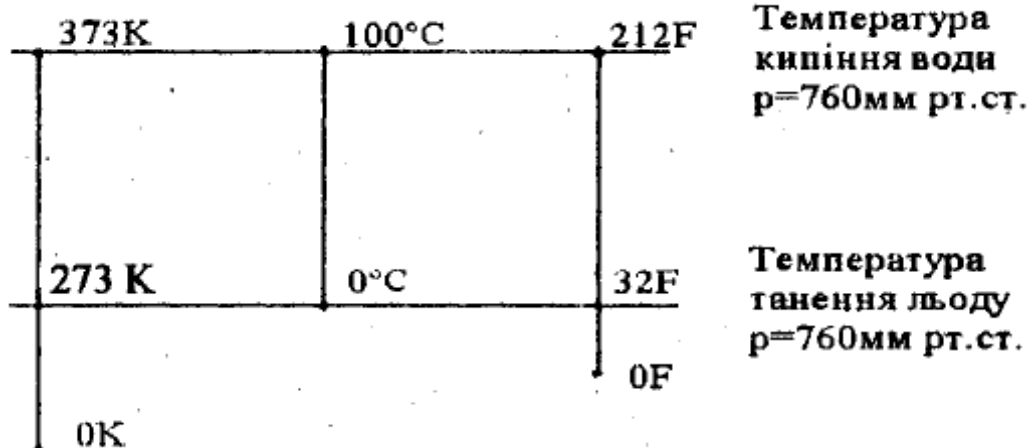
2. Розглядається система циліндр з газом і рухомим поршнем. У першому випадку поршень діаметром 0,5 м не рухається, завдяки вазі, яка встановлюється на поршень. Сила ваги дорівнює 1 МН. Барометричний тиск становить 745 мм рт ст. У другому випадку при незмінному абсолютному тиску змінюється барометричний тиск. Він сягає 760 мм рт ст. Чи треба при цьому змінити силу ваги, яка діє на поршень, щоб він не рухався? І якщо треба, то як?

3. Яка температура вища: 40°C чи 340 K ? Виразити температурний інтервал $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ в кельвінах.

4. У ємкості 200 л знаходиться 0,870 кг газу при надлишковому тиску 0,08 МПа. Визначити абсолютний тиск, густину та питомий об'єм газу, якщо барометричний тиск дорівнює 750 мм рт ст.

5. Нормальна температура тіла людини 37°C . Якій кількості градусів

відповідає ця температура по шкалі Фаренгейта?



Варіант 11

1. Знайти співвідношення між одиницями потужності:

$$1\text{ ккал/год} = \dots \text{ Вт.}$$

2. На початку витікання повітря манометр, який встановлено на балоні, показує 2,5 МПа, а наприкінці витікання - 0,5 бар. У скільки разів зменшиться тиск повітря в балоні, якщо барометричний тиск дорівнює 700 мм рт ст?

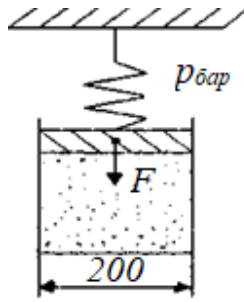
3. При вимірюванні барометричного тиску висотою ртутного стовпа вводиться поправка на температуру зовнішнього середовища за формулою:

$$p_{\text{бар}0} = p_{\text{бар}} \cdot (1 - 0,000172 \cdot t)$$

де t - температура, °С. Написати цей вираз так, щоб його можна було використати за умови, що температура виражається в кельвінах.

4. У скільки разів відрізняється густина метану CH_4 від густини кисню O_2 при нормальних умовах?

5. Циліндр діаметром 200 мм щільно закритий підвішеним на пружині поршнем, умовно невагомим і плинучим без тертя.



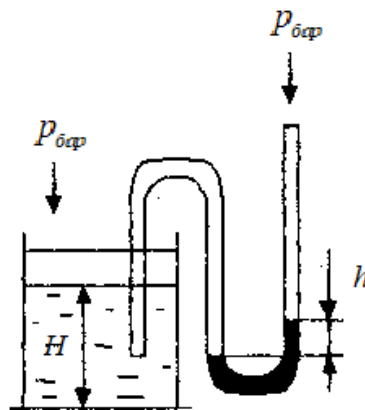
У циліндрі створений вакуум, який складає 90% барометричного тиску $p_{бар}=0,101$ МПа. Визначити силу натягу пружини, якщо поршень нерухомий.

Варіант 12

1. Визначити співвідношення між одиницями тиску:

$$1 \text{ ат} = \dots \text{кгс/см}^2 = \text{кгс/м}^2 = \dots \text{Па} = \dots \text{бар.}$$

2. Для вимірювання рівня рідини в посудині іноді використовується пристрій, показаний на малюнку.



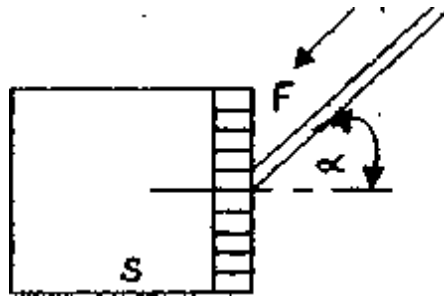
Визначити рівень бензину в баці, якщо $h=220$ мм рт ст, а густина бензину складає 840 кг/м^3 .

3. Температура пари після проходження її через пароперегрівач збільшилась на 250°C . Чому дорівнює збільшення температури в кельвінах? Яка температура пари на виході з пароперегрівача в кельвінах, якщо на вході вона складає 1000°C ?

4. Цистерна вміщує $2 \cdot 10^3$ кг води. Чи вміститься в цій цистерні $2,5 \text{ м}^3$ бензину?

5. Тиск у циліндрі під поршнем, якщо поршень утримується в рівновазі за допомогою стержня, уздовж якого діє сила $F=9,8 \text{ Н}$ (малюнок)? Площа

поршня $S=7 \text{ см}^2$. Стержень складає з нормаллю до поршня кут $\alpha=30^\circ$.



Атмосферний тиск $p_{бар}=0,1 \text{ Па}$. Тертям знехтувати.

Варіант 13

1. Визначити співвідношення між одиницями тиску:

$$1 \text{ МПа} = \dots \text{ бар} = \dots \text{ Па} = \dots \text{ кПа}$$

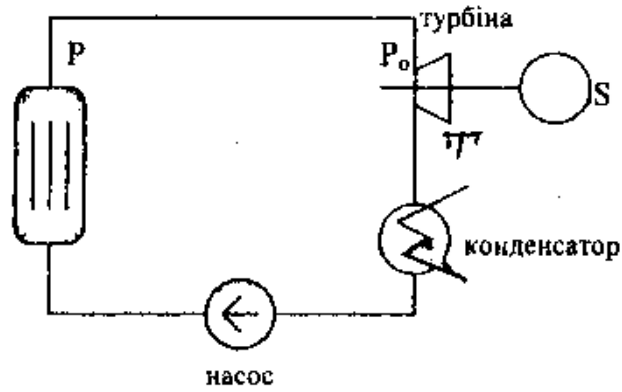
2. Визначити абсолютний тиск пари в конденсаторі, якщо показ ртутного вакуумметра дорівнює 705 мм рт.ст., а показ барометра - 752 мм рт.ст. Тиск виразити в мегапаскалях.

3. Зв'язок між 100-градусною шкалою Цельсія, абсолютною температурною шкалою і шкалою Фаренгейта, що використовується закордоном, можна показати у вигляді схеми. Вивести самостійно формулу для перерахунку $t, ^\circ\text{C}$ в $t, \text{ F}$.

Температура кипіння води при 760 мм рт.ст.	373 К	100°C	212 F
Температура танення льоду при 760 мм рт.ст.	273 К	0°C	32 F
		OK	OF

4. Визначити об'єм 100 кг газу водню при нормальних умовах.

5. Тиск пари на вході в турбіну (Т) атомної електростанції, за паспортними даними, $P=6,65 \text{ МПа}$. Тиск пари на виході з реактора (Р), вимірний манометром, градуйованим у технічних атмосферах, буде $p_{над}=68,6 \text{ ат}$ при показу барометра в приміщенні АЕС $p_{бар}=745 \text{ мм рт.ст.}$ Для забезпечення відповідності паспортних даних турбіни оцінити максимально допустиму втрату тиску $\Delta P, \text{ МПа}$, у трубопроводі.



Варіант 14

1. Визначити співвідношення між одиницями роботи:

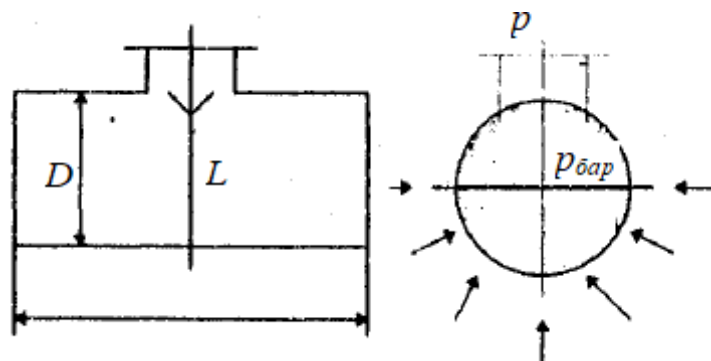
$$0,5 \text{ ккал} = \dots \text{ кДж} = \dots \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

2. Тягомір показує розрідження газів у димовій трубі, яке дорівнює 83 мм рт ст. Визначити абсолютний тиск газів у барах, якщо показання барометра 97 кПа.

3. Температура водяної пари 300°C . На скільки градусів її треба перегріти, щоб температура пари досягла 773 К?

4. З'ясувати, однакові чи ні термодинамічні стани робочого тіла, які характеризуються такими значеннями параметрів: *перший стан*: $P_1=7,2$ МПа, $v_1=0,004$ м³/кг; *другий стан*: $P_2=2485$ мм рт ст, $V_2=0,4$ м³, $m_2=100$ кг.

5. У залізничній цистерні знаходиться в'язкий мазут. Щоб злити мазут в умовах морозної погоди, його треба розігріти. Для цього через верхній люк цистерни опустили трубу, по якій подали насичену водяну пару. Коли мазут був повністю злитий, трубу з цистерни вийняли, а люк негайно герметично закрили. Через деякий час цистерна була зім'ята атмосферним тиском.



Визначити сумарну результуючу силу яка прикладена до нижньої половини бокової поверхні цистерни, якщо відомо, що після конденсації в цистерні всієї пари в ній утворився вакуум $p_{\text{вак}}=700$ мм рт ст., а барометричний тиск $p_{\text{бар}}=0,1$ МПа. Розміри цистерни $l=6000$ мм, $D=2000$ мм.

Варіант 15

1. Визначити співвідношення між одиницями тиску, роботи і потужності:

$$1 \text{ ат} = \dots \text{ кгс/см}^2 = \dots \text{ кгс/м}^2$$

$$1 \text{ кгс м} = \dots \text{ Дж}$$

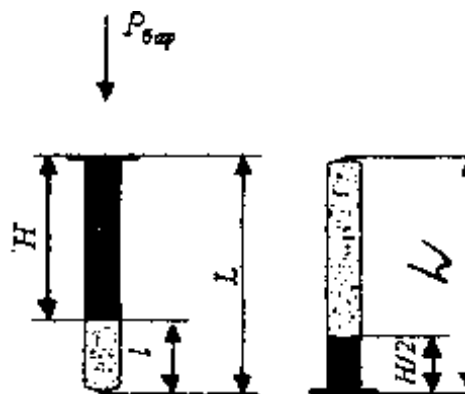
$$1 \text{ кгс м/с} = \dots \text{ Вт}$$

2. У трубці вакуумметра висота стовпа ртуті складає 546 мм рт ст. Над ртуттю знаходиться стовп води висотою 47 мм. Барометричний тиск дорівнює 736 мм рт ст. Визначити абсолютний тиск в посудині, МПа.

3. Яка температура вища: 75°C чи 125 K ? Виразити температурний інтервал $\Delta t=75^\circ\text{C}$ у градусах абсолютної температурної шкали.

4. У парозбирачеві знаходиться водяна пара масою 300 кг. Визначити об'єм парозбирача (м^3), якщо питомий об'єм пари $v=20,2 \text{ м}^3/\text{кг}$.

5. Вузька циліндрична трубка довжиною L запаяна з одного кінця і вміщує повітря, відділене від зовнішнього стовпом ртуті довжиною H . Трубка розташована відкритим кінцем догори.



Якою була довжина l стовпа повітря в трубці, якщо при перевертанні трубки відкритим кінцем донизу з трубки вилася половина ртуті? Густина ртуті дорівнює $\rho_{\text{атм}}$, атмосферний тиск – $p_{\text{бар}}$.

2. РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

Вивчення процесів тепло- і масообміну неможливе без визначення фізичних властивостей різних речовин. На підставі рівнянь технічної термодинаміки можна знаходити різні фізичні параметри робочого тіла: теплоємність, коефіцієнт об'ємного розширення, знаючи хоч би два незалежні параметри стану. До таких рівнянь належить і рівняння стану ідеального газу. Воно широко використовується в теплотехнічних розрахунках через простоту і наочність. Дані, одержані на підставі рівняння стану ідеальних газів, можна з достатнім ступенем точності перенести на реальні середовища, вводючи поправочні коефіцієнти, наприклад, коефіцієнт стискування

$$Z = \frac{Pv}{RT}.$$

Значення цього коефіцієнту наведені у довідниках. Важливий аспект використання рівняння стану ідеального газу - знаходження витратних характеристик: масової m_2 і об'ємної V_2 витрати. Знаючи ці величини конструктор, задаючись швидкістю робочого середовища W , за рівнянням суцільності і нерозривності $W \cdot f \cdot \rho = m_2$, може вчислити площу поперечного перерізу каналу або, навпаки – за заданим розміром каналу обчислити швидкість руху робочого середовища.

Вивчення рівняння стану було б неповним, якби воно не стосувалось сумішей ідеальних газів. Суміші ідеальних газів широко використовуються в теплообмінній апаратурі як гарячі теплоносії, в сушильних установках при сушці димовими газами та в інших технологічних процесах.

2.1 Теоретичні відомості

Технічна термодинаміка вивчає властивості робочих тіл, які беруть участь в термодинамічних процесах. Як відомо, до робочих тіл можна віднести тверді тіла, рідини і гази. Технічна термодинаміка досліджує

газоподібні робочі тіла. У залежності від властивостей газу розглядаються гази реальні та ідеальні.

Ідеальними газами називаються газоподібні речовини, в яких відсутня сила взаємодії (зчеплення) між молекулами і не враховується об'єм самих молекул.

Вивчення ідеального газу має велике практичне значення, оскільки дозволяє одержати прості аналітичні залежності між його параметрами. З трьох розглянутих параметрів стану P , v і T будь-які два є незалежними, такими, що визначають значення всіх інших параметрів стану.

Рівняння, що зв'язує будь-який термодинамічний параметр тіла (системи) з параметрами, прийнятими як незалежні змінні, називається рівнянням стану.

Рівняння, яке зв'язує абсолютний тиск, питомий об'єм і абсолютну температуру, тобто термічні параметри стану, називається термічним рівнянням стану. Його загальний вигляд:

$$F(P, v, T) = 0 \quad (19)$$

Рівняння стану описує тільки рівноважні стани. Вид функції F визначається природою робочого тіла.

Рівняння стану для 1 кг ідеального газу було виведене в 1834 р. французьким фізиком Клапейроном, тому називається рівнянням Клапейрона і має вигляд

$$Pv = RT \quad (20)$$

де R - питома газова стала, що залежить тільки від властивостей конкретного ідеального газу.

Помножимо обидві частини (20) на масу m газу, одержимо:

$$Pv = mRT \quad (21)$$

де V - об'єм всієї маси газу, м³.

Якщо (20) помножити на масу 1 кмоля ідеального газу μ , знайдемо вираз рівняння стану ідеального газу для 1 кмоля:

$$PV_\mu = R_\mu T \quad (22)$$

де V_μ - об'єм 1 кмоля ідеального газу, м³/кмоль; $V_\mu = \mu \cdot \nu$.

У (22) з'явилась нова величина, позначена R_μ . Обчислимо її значення на основі (22):

$$R_\mu = \frac{PV_\mu}{T} \quad (23)$$

Співвідношення (23) буде справедливим для будь-яких умов, отже, і для нормальних: $P_{н.у.} = 101325$ Па, $T_{н.у.} = 273$ К.

Як відомо, при нормальних умовах 1 кмоль ідеального газу займає об'єм 22,4 м³/кмоль, тому:

$$R_\mu = \frac{101325 \cdot 22,4}{273} = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \quad (24)$$

Стала R_μ не залежить від природи газу і для всіх газів є величиною постійною і дорівнює 8314 Дж/(кмоль·К). Її називають універсальною газовою сталою. Зв'язок між питомою газовою сталою і універсальною газовою сталою встановлюється виразом:

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{\mu} \quad (25)$$

Якщо кількість газу складає n кіломолей, то рівняння стану зручно записати так:

$$PV = nR_\mu T = n \cdot 8314 \cdot T \quad (26)$$

де $V = V_\mu \cdot n$ - об'єм всієї маси газу або n кіломолей газу.

Одержане рівняння можна використати і для суміші ідеальних газів. При цьому треба пам'ятати, що сумішню ідеальних газів називаються ідеальні гази, що знаходяться в одному об'ємі та не вступають у хімічні взаємодії.

Величини, які характеризують суміші ідеальних газів:

температура суміші – T ;

тиск суміші – P ;

парціальний тиск компонента суміші – P_i ;

об'єм суміші – V ;

приведений (парціальний) об'єм компонента суміші – V_i ;

склад суміші, який задано частками:

масовими – ω_i ;

об'ємними – φ_i ;

молярними – x_i ;

умовна молекулярна маса суміші (маса 1 кмоля суміші) – $\mu_{\text{сум}}$;

газова стала суміші – $R_{\text{сум}}$;

густина суміші – $\rho_{\text{сум}}$;

питомий об'єм суміші – $\nu_{\text{сум}}$.

Серед перерахованих величин новими поняттями є тільки парціальний тиск, парціальний об'єм компонента суміші і склад суміші. Всі інші характеристики знаходяться на основі властивостей і законів ідеальних газів.

Парціальний тиск. Кожний газ, що входить у суміш, поводить себе так, нібито в суміші немає інших газів, розповсюджуючись по всьому об'єму суміші. Тиск, який мав би при заданій його кількості кожний компонент суміші, якщо б він один займав увесь об'єм при температурі суміші, називається парціальним – P_i . Згідно з законом Дальтона тиск суміші дорівнює сумі парціальних тисків газів, що

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (27)$$

Парціальний об'єм. Парціальним об'ємом називається об'єм, який займав би цей компонент при тиску P і температурі T суміші – V_i . Об'єм суміші ідеальних газів дорівнює сумі парціальних об'ємів його окремих компонентів:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (28)$$

Використовуючи поняття парціального об'єму, а також рівняння стану ідеального газу, можна одержати наступне співвідношення, відоме як закон Бойля:

$$\begin{aligned} P_i V &= m_i R_i T \\ P V &= m_i R_i T \\ P_i V &= P V_i \end{aligned} \quad (29)$$

Склад суміші - кількісне співвідношення окремих газів, що входять до суміші, може бути задане масовими, об'ємними і молярними частками.

Масова частка компонента суміші це відношення маси i -го компонента суміші до маси всієї суміші.

$$\omega_i = \frac{m_i}{m} \quad (30)$$

Оскільки, $m = m_1 + m_2 + \dots + m_i + \dots + m_n = \sum_{i=1}^n m_i$, то

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (31)$$

Об'ємною часткою i -го компонента суміші називається відношення парціального об'єму компонента до об'єму всієї суміші:

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i = \frac{V_i}{V} = \frac{P_i}{P} \quad (32)$$

Підсумовуючи (32) від 1 до n компонентів, одержимо:

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i = 1 \quad (33)$$

Молярною часткою називається відношення числа кіломолей (*i*-го компонента суміші до загального числа кіломолей суміші:

$$x_i = \frac{n_i}{n} \quad (34)$$

Оскільки $n_i = \frac{V_i}{V_{\mu i}}$, $n = \frac{V}{V_{\mu}}$, а $V_{\mu} = V_{\mu i}$ (за законом Авогадро), то $\frac{n_i}{n} = \frac{V_i}{V}$,

тобто

$$x_i = \varphi_i \quad (35)$$

Тому склад суміші звичайно задається в масових і об'ємних частках або відсотках. Наприклад: $\varphi_{N_2} = 70\%$; $\varphi_{O_2} = 30\%$.

При заданих температурі і тиску суміші всі інші характеристики є функціями складу цієї суміші. Доцільно скласти таблицю для розрахунку газових сумішей в залежності від їх складу **табл. 2.1**.

Часто рівняння стану ідеального газу використовують при визначенні витратних характеристик: масової *m*, і об'ємної витрати V_{τ} , які позначають тими ж символами, що і масу та об'єм робочого тіла.

Масова витрата, [кг/с] - це кількість речовини (кг), що проходить через площу поперечного перерізу каналу за одиницю часу (с).

Об'ємна витрата - це об'єм робочого середовища, що проходить через площу поперечного перерізу за одиницю часу. Одиниця виміру - [м³/с]. З визначення об'ємної витрати випливає, що зазначена величина зв'язана зі швидкістю руху середовища в каналі *W* і площиною поперечного перерізу каналу *f*:

$$V_{\tau} = W \cdot f$$

$$\left[\frac{M}{C} \right] \cdot [M^2] = \left[\frac{M^3}{C} \right]$$

Таблиця 2.1. – Розрахунок газових сумішей в залежності від їх складу

Величина, що визначається	Позначення	Знаходження за відомими частками	
		масовими	об'ємними
масова частка	ω_i	-	$\omega_i = \frac{\varphi_i \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \mu_i}$
об'ємна частка	φ_i	$\varphi_i = \frac{\frac{\omega_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{\mu_i}}$	-
умовна молекулярна маса	$\mu_{\text{сум}}$	$\mu_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{\mu_i}}$	$\mu_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \mu_i$
густина і питомий об'єм	$\rho_{\text{сум}}$ $\nu_{\text{сум}}$	$\rho_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{\rho_i}}$ $\nu_{\text{сум}} = \frac{1}{\rho_{\text{сум}}}$	$\rho_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \rho_i$ $\nu_{\text{сум}} = \frac{1}{\rho_{\text{сум}}}$
парціальний тиск	P_i	$P_i = \omega_i \cdot P \frac{R_i}{R_{\text{сум}}}$	$P_i = \varphi_i \cdot P$
газова стала	$R_{\text{сум}}$	$R_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot R_i$	$R_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{R_i}}$

Масова і об'ємна витрати ідеального газу зв'язані між собою рівнянням стану, яке запишеться в наступному вигляді:

$$PV_\tau = m_\tau RT$$

де

$$V_\tau = \frac{V}{\tau}; \quad m_\tau = \frac{m}{\tau}; \quad \tau - \text{час, с}$$

2.2 Контрольні питання

1. Що називається ідеальним газом?
2. Які закони ідеальних газів ви знаєте?
3. Як формулюється закон Авогадро?
4. Між якими величинами встановлює взаємозв'язок рівняння стану ідеального газу?
5. У залежності від кількості розглядуваної речовини можна записати рівняння стану ідеального газу для 1 кг, m кг, 1 кмоль (μ , кг/моль), n кмоль. Який вид мають ці рівняння?
6. Пояснення та одиниці виміру R і R_μ .
7. Що називається сумішшю ідеальних газів?
8. Які величини, що характеризують суміші ідеальних газів, вам відомі?
9. Чи може компонент суміші мати температуру, яка відрізняється від температури суміші?
10. Що представляє собою парціальний тиск компонента суміші?
11. Приведений об'єм, його фізичний зміст.
12. Засоби завдання складу газових сумішей.
13. Що представляє собою умовна молекулярна маса суміші? Як її можна обчислити, знаючи масовий або об'ємний склад суміші?
14. Як визначити газову сталу суміші за її масовим або об'ємним складом?
15. Наведіть формули для розрахунку густини і питомого об'єму суміші, якщо заданий її склад.

2.3 Розв'язування задач і прикладів

Методика розв'язування задач по визначенню величин, що входять в рівняння стану, така. По-перше, необхідно з'ясувати, про яку кількість ідеального газу згадується в задачі. По-друге, у залежності від кількості розглянутого робочого тіла вибрати відповідне рівняння стану: (20), (21), (22)

або (26). По-третє, за відомими значеннями параметрів стану визначити невідомі величини.

Задача 2.1

Визначити густину оксиду вуглецю CO при абсолютному тиску 0,1 МПа і температурі 15°C.

Дано:

$$\mu_{CO} = 28 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$P = 0,1 \text{ МПа}$$

$$t = 15^\circ\text{C} = 288 \text{ К}$$

Знайти:

$$\rho - ?$$

Розв'язок:

Визначимо, з якою величиною, що входить в рівняння стану, пов'язана густина: $\rho = \frac{1}{\nu}$

Оскільки ρ та ν взаємообернені величини, використовуємо рівняння стану (20), яке представлено в вигляді :

$$\rho = \frac{1}{\nu} = \frac{P}{RT} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 28}{8314 \cdot 288} = 1,69 = 1,17 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Відповідь: густина чадного газу $\rho = 1,17 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Задача 2.2

Знайти масу 5 м³ водню, 5 м³ кисню і 5 м³ вуглекислого газу при температурі 100°C і тиску 0,1 МПа.

Дано:

$$V = 5 \text{ м}^3$$

$$\mu_{H_2} = 2 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$\mu_{O_2} = 32 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$\mu_{CO_2} = 44 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$P = 0,1 \text{ МПа}$$

$$t = 100^\circ\text{C} = 373 \text{ К}$$

Знайти: $m_{H_2}, m_{O_2}, m_{CO_2} - ?$

Розв'язок:

В даному завданні йдеться про m кг робочого тіла. Використовуємо рівняння стану (21), і розв'яжемо його з врахуванням питомої газової сталої :

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{\mu}, \quad m = \frac{PV}{RT}$$

$$m_{H_2} = \frac{0,6 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 2}{8314 \cdot 373} = 1,95 \text{ кг}$$

$$m_{O_2} = \frac{0,6 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 32}{8314 \cdot 373} = 30,9 \text{ кг}$$

$$m_{CO_2} = \frac{0,6 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 44}{8314 \cdot 373} = 42,6 \text{ кг}$$

Відповідь: маси ідеальних газів $m_{H_2} = 1,95 \text{ кг}$; $m_{O_2} = 30,9 \text{ кг}$; $m_{CO_2} = 42,6 \text{ кг}$.

Задача 2.3

Який об'єм займе 1 кмоль водню при $P=2 \text{ МПа}$ і $t=200^\circ\text{C}$? Як зміниться результат, якщо замість ідеального газу буде використано кисень?

Дано:

$$\mu_{H_2} = 2 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$\mu_{O_2} = 32 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$n = 1 \text{ кмоль}$$

$$P = 2 \text{ МПа}$$

$$t = 200^\circ\text{C} = 473 \text{ К}$$

Знайти:

$$V \mu_{H_2}, V \mu_{O_2} - ?$$

Розв'язок:

Згідно рівняння стану 1 кмоль ідеального газу:

$$pV_\mu = R_\mu T = 8314 \cdot T.$$

Тоді,

$$V_\mu = \frac{8314 \cdot T}{p}$$

Враховуючи наслідок з закону Авогадро $V_\mu = \text{const}$,

$$\text{одержимо: } V \mu_{H_2} = V \mu_{O_2} = \frac{8314 \cdot 473}{2 \cdot 10^6} = 1,966 = 1,97 \frac{\text{м}^3}{\text{кмоль}}$$

Відповідь: $V \mu_{H_2} = V \mu_{O_2} = 1,97 \frac{\text{м}^3}{\text{кмоль}}$

Задача 2.4

По трубопроводу протікає $10 \text{ м}^3/\text{с}$ кисню при температурі $t=127^\circ\text{C}$ і тиску $P=0,4 \text{ МПа}$. Визначити масову витрату газу і діаметр трубопроводу, якщо швидкість протікання газу $W=15 \text{ м/с}$.

Дано:	Розв'язок:
$\mu_{O_2} = 32 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$ $t = 127^\circ\text{C} = 400 \text{ K}$ $P = 0,4 \text{ МПа}$ $V_\tau = 5 \text{ м}^3$ $W = 15 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ Знайти: $m_\tau, d - ?$	<p style="text-align: center;">Знайдемо масову витрату: $m_\tau = \frac{PV}{RT}$</p> $m_\tau = \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 32}{8314 \cdot 400} = 38,489 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 38,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ <p style="text-align: center;">Визначаємо діаметр трубопроводу:</p> $f = \frac{\pi d^2}{4} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi d^2}{4} = \frac{V_\tau}{W} \\ d^2 = \frac{4V_\tau}{\pi W} \end{array} \right.$ $d = \sqrt{\frac{4V_\tau}{\pi W}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10}{3,14 \cdot 15}} = 0,921 \text{ м}$

Відповідь: $m_\tau = 38,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $d = 921 \text{ мм}$

Задача 2.5

Холодильник складається з двох концентричних труб $d \times \delta = 29 \times 2,5 \text{ мм}$ і $D \times \delta = 54 \times 2,5 \text{ мм}$ (перша цифра означає зовнішній діаметр, друга - товщину стінки труби). По внутрішній трубі протікає розсіл. В міжтрубному просторі проходить 160 кг/год газу при абсолютному тиску 5 бар і середній температурі 0°C . Визначити лінійну швидкість газу, якщо його густина при нормальних умовах $1,2 \text{ кг/м}^3$.

Дано:

$$m_\tau = 160 \frac{\text{кг}}{\text{год}} = 4,4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{сек}}$$

$$t = 0^\circ\text{C}$$

$$P = 5 \text{ бар}$$

$$\rho_{\text{н.у.}} = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$d \times \delta = 29 \times 2,5 \text{ мм}$$

$$D \times \delta = 54 \times 2,5 \text{ мм}$$

Знайти:

$$W - ?$$

Розв'язок:

Знайдемо об'ємну витрату газу при нормальних умовах:

$$V_{\tau \text{ н.у.}} = \frac{m_\tau}{\rho_{\text{н.у.}}} = \frac{4,44 \cdot 10^{-2}}{1,2} = 3,7 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Використовуючи об'єднаний газовий закон, перейдемо від об'єднаної витрати газу при н.у. до умов у міжтрубному просторі:

$$V_{\tau} = V_{\tau_{н.у.}} \cdot \frac{p_{н.у.} \cdot T}{T_{н.у.} \cdot P} = 3,7 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1,013 \cdot 273}{273 \cdot 5}$$

$$V_{\tau} = 0,7496 \cdot 10^{-2} \frac{M^3}{год}$$

Визначимо площу поперечного перерізу каналу:

$$d_b = D - 2\delta = 54 - 5 = 49 \text{ мм}$$

$$d = 29 \text{ мм}$$

$$f = \frac{\pi d_b^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} = 0,785 \cdot (d_b^2 - d^2)$$

$$f = 0,785 \cdot [(49 \cdot 10^{-3})^2 - (29 \cdot 10^{-3})^2] = 0,1225 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

Обчислимо швидкість газу в міжтрубному просторі:

$$V_{\tau} = W \cdot f$$

$$W = \frac{V_{\tau}}{f} = \frac{0,7496 \cdot 10^{-2}}{0,1225 \cdot 10^{-2}} = 6,119 = 6,12 \frac{M}{c}$$

Відповідь: $W = 6,12 \frac{M}{c}$

Задача 2.6

Стальні труби теплообмінника мають діаметр 76x3 мм (перше число означає зовнішній діаметр труби, друге - товщину стінки). По трубах проходить газ під атмосферним тиском. Визначити діаметр труб при роботі з тим же газом, але під надлишковим тиском 5 бар, якщо лінійну швидкість газу бажано зберегти попередньою при тій же масовій витраті і кількості труб. Барометричний тиск прийняти 1 бар.

Дано:

$$d \times \delta = 76 \times 3 \text{ мм}$$

$$n_1 = n_2 = n$$

$$W_1 = W_2$$

$$T_1 = T_2$$

$$P_{бар} = 1 \text{ бар}$$

$$P_{2надл} = 5 \text{ бар}$$

Знайти:

$$d_{вн2} - ?$$

Розв'язок:

Масова витрата газу через теплообмінник:

$$m_{\tau} = V_{\tau} \cdot \rho = W \cdot f \cdot \rho \quad (36)$$

Площа поперечного перерізу трубного простору:

$$f = n \cdot \frac{\pi d_{вн}^2}{4} = 0,785 \cdot n \cdot d_{вн}^2, \quad (37)$$

де n – число труб, $d_{вн}$ - внутрішній діаметр труб.

Підставляючи (37) в (36) отримаємо:

$$m_{\tau} = 0,785 \cdot n \cdot d_{\text{вн}}^2 \cdot W \cdot \rho \quad (38)$$

Використовуючи (38) для двох випадків протікання газу під різними тисками, отримуємо:

$$W_1 \cdot 0,785 \cdot n_1 \cdot d_{\text{вн1}}^2 \cdot \rho_1 = W_2 \cdot 0,785 \cdot n_2 \cdot d_{\text{вн2}}^2 \cdot \rho_2$$

Згідно з умовою задачі: $W_1 = W_2$ та $n_1 = n_2 = n$,

$$\text{тоді } d_{\text{вн1}}^2 \cdot \rho_1 = d_{\text{вн2}}^2 \cdot \rho_2; \quad d_{\text{вн2}}^2 = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

$$d_{\text{вн2}} = d_{\text{вн1}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (39)$$

Розраховуємо $d_{\text{вн1}} = d - 2\delta = 76 - 2 \cdot 3 = 70 \text{ мм} = 0,07 \text{ м}$

Визначимо відношення густини ρ_1/ρ_2 . Згідно рівняння стану ідеального газу при незмінній температурі $T_1 = T_2$, густини газу відносяться прямо пропорційно до абсолютних тисків:

$$\left. \begin{array}{l} P\nu = RT \\ \frac{P}{\rho} = RT \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P_2}{\rho_2} \\ \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{P_1}{P_2} \end{array}$$

$$P_1 = P_{\text{бар}} = 1 \text{ бар}$$

$$P_2 = P_{\text{бар}} + P_{\text{надл}} = 1 + 5 = 6 \text{ бар}$$

Отже, $P_1/P_2 = 1/6$, тоді

$$d_{\text{вн2}} = 0,07 \cdot \sqrt{\frac{1}{6}} = 0,07 \cdot 4,0824 \cdot 10^{-2} = 2,8577 \cdot 10^{-2} = 2,86 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 28,6 \text{ мм}$$

Відповідь: $d_{\text{вн2}} = 28,6 \text{ мм}$

Задача 2.7

Порівняйте газові сталі і тиски двох сумішей при однакових об'ємах і температурах, якщо відомі об'ємні склади і маси сумішей.

	$\varphi_{CO_2} = 0,1$	$\varphi_{CO_2} = 0,1$
Перший стан:	$\varphi_{O_2} = 0,1$	$\varphi_{O_2} = 0,1$
	$\varphi_{N_2} = 0,8$	Другий стан: $\varphi_{N_2} = 0,7$
	$m_1 = 10\text{кг}$	$\varphi_{CO} = 0,1$
		$m_2 = 20\text{кг}$

Дано:

Розв'язок:

Перший стан: Розглянемо газові сталі сумішей, знаючи їх об'ємний склад

$\varphi_{CO_2} = 0,1$ і відносні молекулярні маси компонентів:

$$\varphi_{O_2} = 0,1$$

$$\varphi_{N_2} = 0,8$$

$$m_1 = 10\text{кг}$$

Другий стан:

$$\varphi_{CO_2} = 0,1$$

$$\varphi_{O_2} = 0,1$$

$$\varphi_{N_2} = 0,7$$

$$\varphi_{CO} = 0,1$$

$$m_2 = 20\text{кг}$$

Знайти:

$$\mu_{\text{сум1}} = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \mu_i$$

$$\mu_{\text{сум1}} = 0,1 \cdot 44 + 0,1 \cdot 32 + 0,8 \cdot 28 = 30 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$R_{\text{сум1}} = \frac{8314}{\mu_{\text{сум1}}} = \frac{8314}{30} = 277,13 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\mu_{\text{сум2}} = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \mu_i = 0,1 \cdot 44 + 0,1 \cdot 32 + 0,7 \cdot 28 + 0,1 \cdot 28 = 30 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$R_{\text{сум2}} = \frac{8314}{\mu_{\text{сум2}}} = \frac{8314}{30} = 277,13 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$R_{\text{сум1}} \stackrel{?}{=} R_{\text{сум2}}$ -? Висновок: оскільки $\mu_{\text{сум1}} = \mu_{\text{сум2}}$, то $R_{\text{сум1}} = R_{\text{сум2}}$

$P_1 \stackrel{?}{=} P_2$ -?

Для порівняння тисків сумішей запишемо рівняння стану сумішей ідеальних газів:

$$P_1 V_1 = m_1 R_{\text{сум1}} T_1$$

$$P_2 V_2 = m_2 R_{\text{сум2}} T_2$$

Оскільки $V_1 = V_2$ та $R_{\text{сум1}} = R_{\text{сум2}}$, поділивши перше рівняння на друге,

одержимо:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{m_1}{m_2}, \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{10}{20}, \quad P_1 = \frac{1}{2} \cdot P_2$$

Відповідь: $P_1 = 0,5 P_2$; $P_1 < P_2$ у 2 рази.

Задача 2.8

Суміші аміаку NH_3 з повітрям вибухонебезпечні, якщо в них міститься від 16 до 28% NH_3 по об'єму. Визначити, чи можна використовувати суміш газів, у якій міститься 0,2 кг NH_3 і 0,5 кг повітря?

Дано:

$$m_{\text{NH}_3} = 0,2 \text{ кг}$$

$$m_{\text{пов}} = 0,5 \text{ кг}$$

$$\mu_{\text{NH}_3} = 17 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$\mu_{\text{пов}} = 29 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$\varphi_{\text{NH}_3 \text{грам}} = 16 \dots 28\%$$

Знайти:

$$\varphi_{\text{NH}_3} \rightsquigarrow \varphi_{\text{NH}_3 \text{грам}} - ? \quad \omega_{\text{пов}} = \frac{0,5}{0,7} = 0,714$$

Розв'язок:

Знайдемо об'ємну частку аміаку в суміші газів:

$$\varphi_i = \frac{\omega_i / \mu_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i / \mu_i},$$

де ω_i - масова частка компонента.

$$\omega_i = \frac{m_{\text{NH}_3}}{m_{\text{NH}_3} + m_{\text{пов}}} = \frac{0,2}{0,2 + 0,5} = 0,286$$

$$\text{Тоді, } \varphi_{\text{NH}_3} = \frac{0,286 / 17}{0,286 / 17 + 0,714 / 29} = \frac{1,6823 \cdot 10^{-2}}{1,6823 \cdot 10^{-2} + 2,462 \cdot 10^{-2}} = 0,4059 \text{ (40,59\%)}$$

Відповідь: суміш NH_3 з повітрям можна використовувати.

2.4 Варіанти для домашньої роботи

Порядок виконання домашніх задач наведений в розділі 1.6.

ЗАВДАННЯ Д-4.

Компресор всмоктує V_1 атмосферного повітря за τ (хв) при температурі t ($^{\circ}\text{C}$) і тиску P_1 (МПа), і нагнітає його в резервуар об'ємом V . За який час компресор наповнить резервуар до тиску P_2 (МПа), якщо температура повітря в резервуарі досягне t_2 , $^{\circ}\text{C}$? Перед наповненням резервуар був з'єднаний з атмосферою.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані

№ n/n	V_1 м ³	τ хв	t $^{\circ}\text{C}$	P_1 МПа	V м ³	P_2 МПа	t_2 $^{\circ}\text{C}$
1	4,0	1	10	0,1	8,5	2,0	47
2	4,2	1,2	12	0,11	9,5	2,5	48
3	5,0	1	14	0,09	10,0	3,0	49
4	5,4	2	15	0,08	11,0	3,5	50
5	4,5	1,5	17	0,07	12,0	3,2	51
6	5,8	1	20	0,092	13,0	4,0	53
7	3,1	1	14	0,076	14,0	2,6	53
8	10,2	3	15	0,084	15,0	3,7	54
9	3,5	1	23	0,091	7,0	5,0	46
10	16,0	4	24	0,1	6,0	5,2	45
11	5,6	2	26	0,082	7,7	4,8	54
12	9,0	3	27	0,12	9,2	4,6	55
13	8,5	2,5	28	0,1	8,7	3,8	56
14	8,0	4	29	0,085	10,5	4,2	57
15	10,0	5	30	0,095	12,4	3,6	58

ЗАВДАННЯ Д-5.

Визначити підйомну силу повітряної кулі об'ємом V (м^3) при температурі T (К) і тиску P (мм рт ст), якщо вона заповнена воднем. Яка маса вантажу, який можна підняти цією кулею ?

Таблиця 2.3 - Вихідні дані

<i>№ n/n</i>	V_1 м^3	T К	P мм рт ст
1	20	270	738
2	30	300	745
3	10	298	748
4	40	288	750
5	50	293	756
6	60	303	760
7	70	310	762
8	80	268	770
9	90	282	772
10	35	301	755
11	45	297	764
12	55	305	740
13	65	315	747
14	75	320	756
15	85	278	739

2.5 Індивідуальні завдання

Варіант 1.

1. Молярний об'єм якогось газу (при тиску $P=0,02$ МПа і температурі T) у 3 рази більший, ніж при н.у. Визначити цю температуру. Який це газ, якщо його густина при зазначених P і T дорівнює $0,4167$ кг/м³?
2. Маса порожнього балона для аргону місткістю 40 л дорівнює 64 кг. Визначити масу балона з аргоном, якщо при температурі 15°C балон наповнюється газом до тиску $P=15$ МПа ($\mu_{Ar} = 40$ кг/кмоль).
3. По газопроводу тече вуглекислий газ при тиску $P=5 \cdot 10^5$ Па і температурі $t=17^\circ\text{C}$. Яка швидкість руху газу по трубі, якщо за 5 хвилин через площу поперечного перерізу труби ($f=6$ см²) протікає $m=2,5$ кг вуглекислого газу?
4. В однакових балонах при однаковій температурі знаходяться рівні маси водню H_2 і вуглекислого газу CO_2 . Який з газів і в скільки разів чинить більший тиск на стінку посудини?
5. Визначити масовий, склад газової суміші вуглекислоти і азоту, якщо парціальний тиск вуглекислоти $P_{CO_2} = 1,2$ МПа, а тиск суміші 3 МПа.

Варіант 2.

1. У скільки разів зміниться густина газу в посудині, якщо при постійній температурі показ манометра зменшується від 1,8 до 0,3 МПа? Барометричний тиск прийняти рівним 0,1 МПа.
2. У резервуарі під тиском 0,35 МПа і $T = 800$ К знаходиться 0,842 г газоподібної речовини, що має формулу C_nH_{2n+2} і займає об'єм 1 л. Який це газ?
3. Подача повітряного компресора при нормальних умовах $V_{\tau \text{ н.у.}} = 500$ м³/год. Чому дорівнює масова подача компресора, якщо $\mu_{\text{пов}} = 29$ кг/кмоль)? Відповідь виразити в кілограмах за секунду.
4. При згоранні 1 м³ природною газу, що знаходиться при

нормальних умовах, виділяється 36 МДж теплоти. Скільки теплоти виділяється при спалюванні 10 м^3 , що знаходяться під тиском 110 кПа при температурі 7°C ?

5. Об'ємний склад сухих продуктів згорання палива (які не містять водяної пари) такий: $\text{CO}_2 = 12,3\%$; $\text{O}_2 = 7,2\%$; $\text{N}_2 = 80,5\%$. Знайти умовну молекулярну масу і газову сталу суміші, а також густину і питомий об'єм продуктів згорання при $P = 100 \text{ кПа}$ і $t = 800^\circ\text{C}$?

Варіант 3.

1. Густина ідеального газу при нормальних умовах $0,09 \text{ кг/м}^3$. Визначити, який це газ і його густину при абсолютному тиску $0,12 \text{ МПа}$ і температурі 400°C .

2. У балоні знаходиться 12 кмоль ідеального газу при $P = 1,0 \text{ МПа}$ і $t = 80^\circ\text{C}$. Визначити кількість азоту, що витік з балону, якщо тиск у балоні знизився до $0,35 \text{ МПа}$, а температура зменшилась до 25°C ?

3. Дуттєвий вентилятор подає в топку парового котла $102000 \text{ м}^3/\text{год}$ повітря при температурі 300°C і надлишковому тиску $20,7 \text{ МПа}$. Барометричний тиск повітря в приміщенні $100,7 \text{ кПа}$. Визначити масову витрату повітря, а об'ємну витрату привести до нормальних умов.

4. У горизонтально розташованій посудині, розділеній легкорухомим поршнем, знаходиться з однієї сторони від поршня m_1 грамів кисню, а з другої - m_2 грамів водню. Температури газів однакові і дорівнюють T_0 . Яким буде відношення об'ємів, що займають гази, якщо температура водню залишиться T_0 , а кисень нагрівається до температури T_1 ?

5. Порівняти питомі і молярні об'єми двох сумішей, що мають однаковий тиск і температуру, при такому об'ємному складі:

1) $\varphi_{\text{N}_2} = 0,76$; $\varphi_{\text{O}_2} = 0,2$; $\varphi_{\text{CO}_2} = 0,04$

2) $\varphi_{\text{N}_2} = 0,8$; $\varphi_{\text{O}_2} = 0,2$

Варіант 4.

1. Визначити тиск повітря в стандартному балоні місткістю 40 л при температурі 15°C, якщо маса зараженого балона 70 кг, а незаряженого 65 кг ($\mu_{\text{пов}} = 29$ кг/кмоль).

2. Знайти кількість кіломолив, які є в посудині, якщо об'єм посудини 750 л, температура газу складає 121°C, а розрідження дорівнює 200 мм рт ст. Барометричний тиск прийняти 740 мм рт ст.

3. По трубах теплообмінника, що складається з 379 труб діаметром 16x1,5 мм, проходить азот. Об'ємна витрата азоту 6400 м³/год., віднесена до нормальних умов. Надлишковий тиск і температура в трубному просторі теплообмінника відповідно 0,3 МПа і 120°C. Визначити швидкість руху азоту в трубах, якщо барометричний тиск складає 0,1 МПа.

4. У балоні місткістю 110 л розміщено 0,8 кг водню і 1,6 кг кисню. Визначити тиск суміші на стінки посудини. Температура суміші 27°C.

5. Порівняти газові сталі і тиски двох сумішей при однакових об'ємах і температурах, якщо відомі об'ємний склад і маси сумішей:

$$1) \varphi_{CO_2} = 0,1; \quad \varphi_{O_2} = 0,1; \quad \varphi_{N_2} = 0,8; \quad m = 10 \text{ кг}$$

$$2) \varphi_{CO_2} = 0,1; \quad \varphi_{O_2} = 0,1; \quad \varphi_{N_2} = 0,7; \quad \varphi_{CO} = 0,1; \quad m = 20 \text{ кг}$$

Варіант 5.

1. Тиск газу по манометру складає 0,3 МПа при температурі 60 °С. При цьому газ займає об'єм 2,5 м³. Визначити об'єм ідеального газу при нормальних умовах ($P_{\text{бар}}=0,1$ МПа).

2. У циліндрі діаметром 0,6 м міститься 0,41 м³ повітря при $P=0,25$ МПа і $t=35^\circ\text{C}$. До якої температури повинно нагрітися повітря при постійному тиску, щоб поршень, який рухається без тертя, піднявся на 0,4 м?

3. По трубопроводу тече 35 т/год газу CO_2 при надлишковому тиску 3 бар і температурі 220°C. Визначити діаметр трубопроводу при швидкості газу 20 м/с. Барометричний тиск прийняти 750 мм рт ст.

4. Заповнити таблицю даними, яких бракує, використовуючи

властивості ідеального газу.

$\mu, \text{кг/кмоль}$	$R, \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$	$\rho_{\text{н.у.}}, \text{кг/м}^3$
***	***	2,86

5. Порівняти температуру T і число кіломолей n двох газових сумішей, які мають однакові об'єми і тиски, якщо відомі їх склади:

1) $m_{N_2} = 1,6 \text{ кг}; \quad m_{O_2} = 0,4 \text{ кг}$

2) $m_{N_2} = 1,4 \text{ кг}; \quad m_{O_2} = 0,6 \text{ кг}$

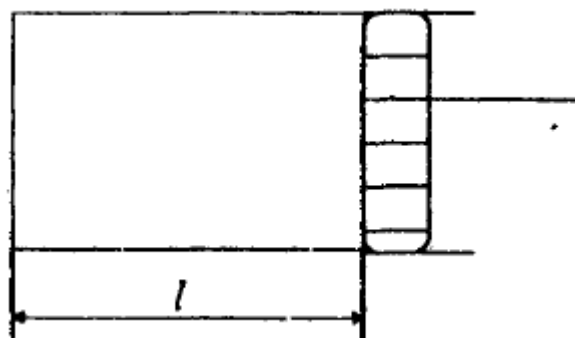
Варіант 6.

1. У скільки разів більша маса чадного газу в резервуарі при 10°C , ніж при 50°C , якщо тиск залишається незмінним?

2. Визначити об'єм резервуара для 8 кг повітря при надлишковому тиску 1200 мм рт ст. і температурі 100°C . Як зміниться надлишковий тиск в резервуарі, якщо температура повітря знизиться до 0°C ? Прийняти $P_{\text{бар}} = 750$ мм рт ст. ($\mu_{\text{нов}} = 29$ кг/кмоль).

3. При вимірюванні витрати повітря за допомогою витратомірного пристрою було зафіксовано, що при $P = 100$ кПа і $t = 20^\circ\text{C}$ витрата повітря дорівнює 24 л/хв. Визначити масову витрату повітря (кг/с) і об'ємну витрату при нормальних умовах ($\text{м}^3/\text{с}$).

4. У скільки разів зміниться тиск повітря в циліндрі (малюнок), якщо поршень переміститься ліворуч на $1/3 \cdot l$; праворуч на $1/3 \cdot l$? Температура газу залишається постійною.



5. Порівняти парціальні тиски і наведені об'єми кисню (O_2) в двох сумішах, які займають рівні об'єми при однаковій температурі і мають такий

склад:

- 1) $N_2 = 0,8 \text{ кг}$; $CO_2 = 0,1 \text{ кг}$; $O_2 = 0,1 \text{ кг}$
- 2) $N_2 = 0,7 \text{ кг}$; $CO_2 = 0,1 \text{ кг}$; $O_2 = 0,1 \text{ кг}$

Варіант 7.

1. Визначити масу 1 кмоль ідеального газу, який при тиску $P=0,25 \text{ МПа}$ і температурі $t = 75^\circ\text{C}$ має густину $\rho = 2,71 \text{ кг/м}^3$.

2. Посудина об'ємом 100 м^3 наповнена газом $R=600 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$. Знайти масу газу в посудині, якщо при температурі газу 27°C манометр показує 136 мм вод ст. , а тиск атмосферного повітря 760 мм рт ст.

3. У підігрівач повітря поступає $5 \text{ м}^3/\text{с}$ газу при температурі 25°C . Температура підігрітого повітря складає 500°C . Визначити швидкість повітря після підігрівача, якщо площа поперечного перерізу вихідного штуцера $f=4 \text{ м}^2$. Вважати, що тиск у підігрівачі лишається сталим.

4. При збільшенні абсолютної температури ідеального газу в 2 рази тиск газу збільшується на 25% . У скільки разів при цьому зміниться його об'єм?

5. Визначити газову сталу суміші, що складається з 1 м^3 генераторного газу і $1,5 \text{ м}^3$ повітря при нормальних умовах, якщо густина генераторного газу при цих умовах $1,2 \text{ кг/м}^3$.

Варіант 8.

1. Визначити температуру, при якій густина ідеального газу азоту складає $0,65 \text{ кг/м}^3$, якщо його тиск дорівнює $0,105 \text{ МПа}$.

2. Компресор всмоктує 3 м^3 атмосферного повітря за 1 хв. при $t=15^\circ\text{C}$ і тискові $0,1 \text{ МПа}$ і нагнітає його в резервуар об'ємом $8,5 \text{ м}^3$. За який час компресор наповнить резервуар до тиску 2 МПа , якщо температура повітря в резервуарі досягне 47°C ? Перед наповненням резервуар був з'єднаний з атмосферою. Відповідь виразити в хвилинах і секундах.

3. Стальні труби теплообмінника мають діаметр 76×3 (перше число означає зовнішній діаметр труби, друге - товщину стінки). По трубах

проходить газ під атмосферним тиском. Визначити діаметр труби при роботі з тим же газом, але під надлишковим тиском 5 бар, якщо лінійну швидкість газу бажано зберегти попередньою при тих же масовій витраті і кількості труб. Барометричний тиск прийняти 750 мм рт ст.

4. При зменшенні об'єму газу в 2 рази тиск збільшився на 120 кПа, а абсолютна температура виросла на 10%. Яким був первинний тиск?

5. Визначити умовну молекулярну масу суміші газів, що складається з 6,67% водню і 93,3% оксиду вуглецю (по масі). Знайти питомий об'єм суміші при тискові 760 мм рт ст. і температурі 0°C.

Варіант 9.

1. Визначити масу і об'єм 1/4 кмоля азоту при температурі 1500°C і тискові 0,1 МПа.

2. Знайти густину H_2 в посудині при температурі 25°C, якщо ртутний вакууметр, приєднаний до посудини, показує розрідження 240 мм рт ст., а тиск атмосферного повітря 750 мм рт ст.

3. Холодильник складається з двох концентричних сталевих труб $d=29 \times 2,5$ мм і $D=54 \times 2,5$ мм (перша цифра означає зовнішній діаметр труби, друга - товщину стінки труби). По внутрішній трубі протікає холодильний розсіл. У міжтрубному просторі проходить 160 кг/год газу під абсолютним тиском 0,5 МПа і середній температурі 0°C. Визначити лінійну швидкість газу. Густину газу при н.у. прийняти 1,2 кг/м³.

4. Заповнити таблицю даними, яких не вистачає, використовуючи властивості ідеальних газів.

$\mu, \text{кг/кмоль}$	$R, \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$	$\rho_{\text{н.у.}}, \text{кг/м}^3$	$\nu_{\text{н.у.}}, \text{м}^3/\text{кг}$
2	***	***	***

5. Знайти наведені об'єми компонентів суміші, масова частка яких: 40% H_2 , 50% SO , і 10% CO_2 , якщо об'єм, який займає суміш дорівнює 2м³.

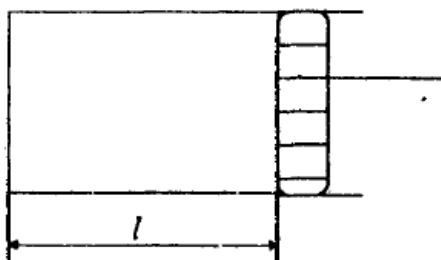
Варіант 10.

1. Балон ємністю 40 л вміщує 1,98 кг вуглекислого газу при 0°C . Балон витримує тиск 3,0 МПа. При якій температурі балон може розірватися?
2. Надлишковий тиск кисню в балоні місткістю 100 л дорівнює 0,9 МПа при температурі 20°C . Після підкачування показ манометра збільшився до 10,4 МПа, а температура - до 70°C . Скільки кілограмів кисню надійшло в балон? Тиск навколишнього середовища по барометру - 1 бар.
3. Масова витрата водяної пари по трубопроводу діаметром 50 мм складає 0,03 кг/с при температурі 47°C і тиску 0,2 МПа. Обчислити швидкість руху водяної пари по трубопроводу.
4. Пляшка з газом щільно закупорена пробкою площа перерізу якої $2,5\text{ см}^2$. До якої температури треба нагріти газ, щоб пробка вилетіла з пляшки, якщо сила тертя, яка утримує пробку, 12 Н. Первісний тиск повітря в пляшці і зовнішній тиск однакові і дорівнюють 100 кПа, а початкова температура складає 3°C .
5. Суміші аміаку (NH_3) з повітрям, які вміщують від 0,16 до 0,28 об'ємних часток NH_3 , вибухонебезпечні. Визначити чи можна використати суміш газів, у якій міститься 0,2 кг NH_3 і 0,5 кг повітря.

Варіант 11.

1. Визначити густину кисню при розрідженні 175 мм рт ст і температурі $t = -13^{\circ}\text{C}$. Прийняти $P_{\text{бар}} = 760\text{ мм рт ст}$.
2. При стиску ідеального газу об'єм його зменшився в 3,5 рази, а температура збільшилась від 23 до 150°C . У скільки разів зміниться тиск газу?
3. Визначити швидкість протікання вуглекислоти (CO_2) по трубопроводу діаметром $57 \times 3,5\text{ мм}$., якщо масова витрата $\text{CO}_2 = 200\text{ кг/год}$ при температурі 38°C і абсолютному тиску 3 бар.
4. Температура повітря в циліндрі 7°C (малюнок). Наскільки переміститься поршень при нагріванні повітря на 20 К , якщо $l = 14\text{ см}$? Тиск

повітря вважати незмінним.



5. Суміш задана об'ємними частками: 20% CO і 80% CO₂. Визначити її газову сталу і густину при н.у. (760 мм рт ст., 0°C).

Варіант 12.

1. Визначити молекулярну масу ідеального газу, який при тискові 2,5 бар і температурі 75°C має густину 2,71 кг/м.

2. На скільки більше вміщується в балоні, об'єм якого $V=40$ л, вуглекислого газу, ніж водню при температурі 15°C і тиску за манометром 15 МПа, якщо барометричний тиск (750 мм рт ст)?

3. По трубах теплообмінника, у якому є 379 труб діаметром 16x1,5 мм, проходить 6400 м³/год азоту, який приведений до нормальних умов. Тиск азоту $P_{надл} = 3$ бар, а середня температура складає 30°C. Визначити швидкість руху азоту в трубах $P_{бар} = 750$ мм рт ст).

4. При якій температурі знаходився газ у закритій посудині, якщо при нагріванні його на 140к тиск збільшився в 1,5 рази?

5. Газова суміш має такий масовий склад: CO₂=12%, O₂ = 8%, N₂ = 80%. До якого тиску треба довести цю суміш, яка перебуває при нормальних умовах, щоб густина її склала 1,6 кг/м³, а температура лишалась незмінною?

Варіант 13.

1. Визначити об'єм 1 кмоль ідеального газу CO при тиску 5 бар і температурі 60°C. Як зміниться результат, якщо як ідеальний газ буде використаний H₂?

2. Знайти кількість кисню, який витік з балону місткістю 40 л, якщо

тиск у ньому знизився від 196 до 49 бар, а температура лишилась постійною і рівною 20°C.

3. На АЕС працює газотурбінна установка закритого типу, яка використовує як робоче тіло вуглекислий газ. Через сопловий апарат при температурі 550°C і тискові 8 МПа газ подається на лопатки турбіни. Визначити необхідну площу вихідного перерізу соплового апарату, якщо швидкість газів, які витікають з нього при зазначених параметрах складає 90 м/с, а масова витрата дорівнює 3514 кг/с.

4. При виготовленні електроламп їх наповнюють інертним газом при температурі $t=150^{\circ}\text{C}$. Під яким тиском повинні наповнюватись лампи, щоб при температурі $t=300^{\circ}\text{C}$, яка є в лампі при горінні, тиск у лампі не перевищував би $P_2=0,1$ МПа?

5. Порівняти умовні молекулярні маси і газові сталі двох сумішей такого складу:

1) $\varphi_{O_2} = 0,2$; $\varphi_{N_2} = 0,8$

2) $\varphi_{O_2} = 0,7$; $\varphi_{N_2} = 0,2$; $\varphi_{CO_2} = 0,1$

Варіант 14.

1. При температурі 800°C і тискові 0,1 МПа густина газу $\rho=0,4477$ кг/м³. Що це за газ? (Молекулярні маси ідеальних газів: водень - $\mu_{H_2} = 2$ кг/кмоль; неон - $\mu_{He} = 20,2$ кг/кмоль; аргон - $\mu_{Ar} = 40$ кг/кмоль; криптон - $\mu_{Kr} = 84$ кг/кмоль; кисень - $\mu_{O_2} = 32$ кг/кмоль.

2. Компресор подає стиснуте повітря в резервуар, при цьому тиск у резервуарі, за манометром, підвищується від 0,1 до 0,8 МПа, а температура - від 20 до 27°C. Визначити масу повітря, поданого компресором у резервуар, якщо об'єм резервуара 5 м³, а барометричний тиск складає 750 мм рт ст ($\mu_{пов} = 29$ кг/кмоль.).

3. Паротурбінна установка потужністю $N=100$ МВт має питому витрату палива $b=0,37$ кг/(кВт·год). Якою повинна бути масова сумарна подача вентиляторів у топку котла, якщо об'ємна витрата повітря на 1 кг палива

складає 15 м, віднесених до нормальних умов.

4. У циліндрі з площею основи 100 см^2 знаходиться повітря. Поршень розташований на висоті 50 см від днища циліндра. На поршень кладуть вантаж масою 50 кг, при цьому він спускається на 10 см. Визначити температуру повітря після спуску поршня, якщо до цього тиск був 101 кПа, а температура 12°C .

5. Розрахувати $\mu_{\text{сум}}, R_{\text{сум}}$ суміші пари оксиду вуглецю (IV) і води. Масова частка оксиду вуглецю (IV), якщо $\omega_{\text{CO}_2} = 0,9383$.

Варіант 15.

1. Визначити газову сталу і питомий об'єм азоту при температурі 15°C і тиску $5 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

2. Балон з киснем об'ємом 40 л має надлишковий тиск 13,9 МПа при температурі $t = -23^\circ\text{C}$. Визначити надлишковий тиск кисню в балоні після того, як температура його стала $t_2 = +27^\circ\text{C}$. Визначити кількість кисню, яку треба випустити, щоб при температурі $t_3 = t_2 = +27^\circ\text{C}$ тиск за манометром знову упав до $P_{\text{надл}}$. Барометричний тиск прийняти $P_{\text{бар}} = 750 \text{ мм рт ст}$.

3. У нагрівач повітря надходить $2 \text{ м}^3/\text{с}$ газу при температурі 25°C і надлишковому тиску 272 мм рт ст. Визначити швидкість підігрітого повітря в повітроводі після нагрівача, якщо повітровід має прямокутний переріз $1,6 \times 2,3 \text{ м}$. Температура підігрітого повітря дорівнює 220°C . Барометричний тиск складає 740 мм рт ст (процес в нагрівачеві повітря вважати ізобарним).

4. Який тиск робочої суміші встановлюється в циліндрах двигуна автомобіля, якщо під кінець такту стискування температура підвищується від 50 до 250°C , а об'єм зменшується від $0,75$ до $0,12 \text{ л}$? Первісний тиск дорівнює 80 кПа .

5. Парціальний тиск аміаку в суміші з повітрям складає $0,02 \text{ МПа}$. Визначити, чи вибухонебезпечна ця суміш газів, якщо недопустима концентрація NH_3 в об'ємних частках складає $0,16 \dots 0,28$, а загальний тиск дорівнює $0,1 \text{ МПа}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Константинов С.М. Технічна термодинаміка. Київ, „політехніка”, 2001,- 377с.
2. Буляндра, О. Ф. Технічна термодинаміка [текст] : Підручник / О. Ф. Буляндра. – 2-ге. вид., випр. – К. : Техніка, 2006. – 320 С.
3. Константинов С.М. Теоретичні основи теплотехніки. – К.: Золоті ворота, 2012. – 592 с.
4. Дубровська, В.В. Термодинаміка та теплообмін: Навч. посіб. / В.В.Дубровська, В.І. Шкляр – К.: НТУУ«КПІ», Вид-во “Політехніка», 2016. – 152 с.
5. Константинов С.М., Луцик Р.В. Збірник задач з технічної термодинаміки, Київ, „Політехніка”, 2002,- 378с.
6. Кириллін В.А., Сичов В.В., Шейндлін А.Е. Технічна термодинаміка. — М.: Наука, 1979. — 512 с.
7. Гуржий А.А., Огородников П.И. Теплотехника: Курс лекцій – К.: Издательский дом «Слово», 2003. – 254 с.
8. Константинов С.М., Луцик Р.В. Збірник задач з технічної термодинаміки та теплообміну. Навч. Посіб. – К.: Видавництво «Освіта України», 2009. – 544 с.

ДОДАТКИ

Додаток 1 - Приставки для утворення кратних одиниць

<i>Приставка</i>	<i>Позначення</i>	<i>Десятинний множник</i>
Тера	Т	10^{12}
Гіга	Г	10^9
Мега	К	10^6
Кіло	К	10^3
Гекто	Г	10^2
Дека	Да	10^1
Деци	Д	10^{-1}
Сант	с	10^{-2}
Мілі	м	10^{-3}
Мікро	мк	10^{-6}
Нано	н	10^{-9}
Піко	п	10^{-12}
Фемто	ф	10^{-15}
Ато	а	10^{-18}

Додаток 2 - Співвідношення одиниць виміру

$1 \text{ літр} = 10^{-3} \text{ м}^3$
$1 \text{ техн атм} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 10^4 \cdot 9,8 \text{ Н/м}^2 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па} = 735 \text{ мм рт ст} = 10 \text{ м вод ст} = 10^4 \text{ мм вод ст} = 0,98 \text{ бар}$
$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 10^2 \text{ кПа} = 0,1 \text{ МПа} = 750 \text{ мм рт ст} = 1,02 \text{ техн атм}$
$1 \text{ ккал} = 427 \text{ Гм} = 427 \cdot 9,8 \text{ Н} \cdot \text{м} = 4187 \text{ Дж} = 4,19 \text{ кДж}$
$1 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 10^3 \text{ Дж/с} \cdot 3600 \text{ с} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 3,6 \text{ МДж} = 3600 \text{ кДж} = 3600/4,19 \text{ ккал} = 860 \text{ ккал}$
$1 \text{ кВт} = 860 \text{ ккал/год}$
$1 \text{ ккал/год} = 1,163 \text{ Вт}$
$1 \text{ Гкал} = 10^9 \text{ кал} = 10^6 \text{ ккал}$

Додаток 3 - Переведення одиниць вимірювання тиску

<i>Одиниці</i>	<i>кгс/см²</i>	<i>Па</i>	<i>ат тех.атм</i>	<i>атм фіз атм</i>	<i>бар</i>	<i>мм.рт.ст</i>	<i>мм.вод.ст</i>
<i>кгс/см²</i>	1	9,81	$1 \cdot 10^{-4}$	$0,97 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$735,5 \cdot 10^{-4}$	1
<i>Па</i>	0,102	1	$0,102 \cdot 10^{-4}$	$0,987 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$750 \cdot 10^{-5}$	0,102
<i>ат</i>	$1 \cdot 10^4$	$9,8 \cdot 10^4$	1	0,9678	0,98	735,55	$1 \cdot 10^4$
<i>атм</i>	$1,033 \cdot 10^4$	$1,013 \cdot 10^5$	1,033	1	1,01	760	$1,033 \cdot 10^4$
<i>бар</i>	10197	$1 \cdot 10^5$	1,01972	1,01972	1	750	10197
<i>мм рт ст</i>	13,595	133,322	$13,56 \cdot 10^{-4}$	$13,16 \cdot 10^{-4}$	0,00133	1	13,595
<i>мм вод ст</i>	1	9,81	$1 \cdot 10^{-4}$	$0,97 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$735,5 \cdot 10^{-4}$	1