Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни

ТЕПЛОТЕХНІКА І ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

для здобувачів вищої освіти
денної та заочної (дистанційної) форм навчання:
освітня програма Агроінженерія
спеціальність H7 Агроінженерія

Кропивницький, ЦНТУ
2026

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни

ТЕПЛОТЕХНІКА І ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

для здобувачів вищої освіти
денної та заочної (дистанційної) форм навчання:
освітня програма Агроінженерія
спеціальність Н7 Агроінженерія

Затверджено на засіданні кафедри
«Матеріалознавство та ливарне
виробництво»
Протокол № 2 від 06.09.2026 р.

Кропивницький, ЦНТУ
2026

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з дисципліни Теплотехніка і теплопостачання для здобувачів вищої освіти денної та заочної (дистанційної) форм навчання: освітня програма Агроінженерія спеціальність H7 Агроінженерія. Укл.: М. В. Босий – Кропивницький: ЦНТУ, 2026. 82 с.

Укладач: старший викладач, Босий Микола Вікторович

Рецензент: канд.техн. наук., доц. Ковальов Юрій Григорович

З М І С Т

Загальні положення 5
1. Вимірювання термічних параметрів стану газу 6
2. Визначення показника адіабати повітря 14
3. Вивчення властивостей та термодинамічних процесів водяної пари 22
4. Вивчення роботи поршневого компресора 26
5. Визначення коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів 32
6. Тепловіддача циліндричної труби при природній конвекції 38
7. Види та розрахунок теплообмінних апаратів 45
8. Випробування автономного кондиціонера 49
Задачі для самостійної роботи 56
Додатки 73
Список літератури 82

Загальні положення

Методичні рекомендації складені згідно з навчальним планом і робочою програмою дисципліни « Теплотехніка і теплопостачання ».

Матеріал курсу вивчають за основною літературою. Для більш глибокого вивчення окремих питань та виконання самостійної роботи рекомендована додаткова література.

У результаті вивчення дисципліни у здобувачів визої освіти повинні сформуватися знання: теплотехнічної термінології; законів отримання, перетворення, передачі і використання енергії; методів аналізу ефективності використання теплоти; принципів дії, галузей використання та потенційних можливостей теплотехнічного обладнання і захисту навколишнього середовища.

Лабораторні роботи з теплотехніки та теплопостачання виконуються паралельно з читанням лекцій. Перед виконанням лабораторної роботи здобувачі вищої освіти повинні вивчити теоретичний матеріал, знати мету і порядок проведення роботи.

Звіт з кожної лабораторної роботи оформляється на аркушах формату А4. Першою сторінкою загального звіту вважається титульний аркуш, який не нумерується. Наступний аркуш має номер 2 і т.д.

У звіті вказується назва і номер лабораторної роботи, її мета, порядок проведення роботи, наводяться результати розрахунків і висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1
ВИМІРЮВАННЯ ТЕРМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ ГАЗУ

1.1. Мета роботи

Вивчення методів вимірювання температури і тиску, будову і принцип роботи приладів для вимірювання тиску і температури, одиниці тиску і методику перерахунку раніш застосованих одиниць у міжнародну систему одиниць вимірювання (СІ). Експериментальне визначення термічних параметрів стану з урахуванням похибки приладів.

1.2. Загальні відомості

В термодинаміці розглядають, як правило, прості теплотехнічні системи, внутрішній стан яких однозначно визначається трьома основними параметрами: абсолютним тиском $p_{\text{абс.}}$, абсолютною температурою T і питомим об'ємом v.

Абсолютний тиск $p_{\text{абс.}}$ є силою, яка діє по нормалі до поверхні тіла і віднесена до одиниці площі цієї поверхні.

$$p_{\text{абс.}} = P/f\ . \tag{1.1}$$

Згідно молекулярно-кінетичної теорії тиск газу визначається рівнянням

$$p = \frac{2}{3} n m c^2, \tag{1.2}$$

де n – число молекул в одиниці об'єму;

m – маса молекули;

c^2 – середня квадратична швидкість поступового руху молекул.

Відлік абсолютного тиску проводиться від абсолютного нуля або від абсолютного вакууму. Тиск рідини, яка знаходиться в спокої, має також назву статичного.

В практиці вимірюють такі тиски:

а) атмосферний (барометричний), який вимірюється за допомогою барометрів;

б) надлишковий (манометричний) $p_{\text{над.}}$, який являє собою тиск, що перевищує атмосферний і вимірюється за допомогою манометрів;

в) розрідження, або вакуум $p_{\text{вак}}$, який являє собою тиск, недостатній до атмосферного, і вимірюється вакуумметрами.

Всі манометри вимірюють надлишковий тиск $p_{\text{над.}}$, який дорівнює різниці між абсолютним $p^{\text{н}}_{\text{абс.}}$ і барометричним тиском B.

$$p_{\text{над.}} = p^{\text{н}}_{\text{абс.}} - B\ , \tag{1.3}$$

а абсолютний надлишковий тиск розраховується за формулою

$$p^{\text{н}}_{\text{абс.}} = B + p_{\text{над.}} \tag{1.4}$$

Якщо абсолютний тиск менше барометричного ($p_{\text{абс.}} < B$), то вимірюється розрідження (вакуум) і прилад називається вакуумметром

$$p_{\text{вак.}} = B - p^{\text{в}}_{\text{абс}}, \tag{1.5}$$

а абсолютний тиск вакууму розраховується за формулою

$$p^{\text{в}}_{\text{абс.}} = B - p_{\text{вак.}} \tag{1.6}$$

Згідно з Міжнародною системою вимірювань (СІ), тиск вимірюється в паскалях:

1 Па = 1 Н/м^2 ,

а також застосовуються інші одиниці тиску до введення системи СІ: (додаток 1)

1атм = 1кГс/см^2 ; 1мм.вод.ст. = 9,81Па ; 1мм.рт.ст. = 133Па

1 техн. атм. = 1 кгс/см^2 = 10 м. вод.с = 735,55 мм. рт.с.= 9,81·10^{4}Па =

=0,0981МПа = 0,980665 бар;

1 фіз. атм.= 1,033 кг/см^2 = 760 мм. рт. ст. = 1,01·10^{5}Па = 0,1МПа

1 бар = 0,1 МПа = 100 кПа = 100000 Па = 750,06 мм. рт.с. = 10,1972 м. вод.с.

1кПа = 10^{3}Па ; 1МПа = 10^{6}Па

Для вимірювання тиску використовуються різні типи манометрів: рідинні *U*-подібні; вантажнопоршневі еталонні; деформаційні; манометри електроопору; п’єзокварцеві, тензометричні, місткістні.

Прилади, призначені для одночасного вимірювання надлишкового тиску і вакууму, називаються мановакуумметрами.

При точних вимірюваннях тиску враховуються приладові похибки манометрів і вводять коректуючі поправки.

Прилади для вимірювання тиску

- рідинний манометр

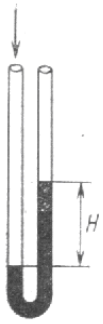


Рисунок 1.1 – Рідинний манометр

- вантажопоршневі манометри

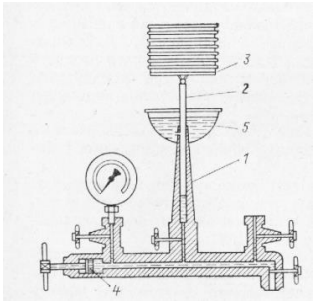


Рисунок 1.2 – Вантажопоршневий манометр

Найпростіший вантажопоршневий манометр представлений на рис. 1.2. Робочими частинами манометра є циліндр 1 і поршень 2 з тарілкою 3, на яку можна покласти вантаж. Поршень чітко прилягає до циліндра, так що зазор між

ними складає 1-2 мкм. Під поршень манометра залито масло. Площа поршня дорівнює 1см^2, тому кожний кілограм вантажу, покладеного на тарілку манометра, створює тиск масла 1 кгс/см^2. Для подачі масла служить гвинтовий прес 4. Вимірювання тиску проводиться під час обертання поршня і тарілки з вантажем; при цьому невелика кількість масла витікає через зазор між поршнем і циліндром в чашку 5, забезпечуючи надійне змащування поверхонь, що труться.

- деформаційні манометри

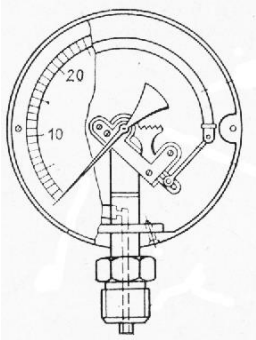


Рисунок 1.3 – манометр з трубчатою пружиною

Найбільше розповсюдження одержали манометри прямої дії, в яких переміщення чутливого елементу визиває переміщення стрілки пристрою. В якості прикладу на рис. 1.3 наведена принципова схема манометра прямої дії.

Манометри електроопору – для вимірювання дуже великих тисків – 200 МПА. Залежність зміни опору проволоки від тиску.

П'єзокварцові – для вимірювання швидкозмінюючого тиску. Явище виникнення електричного заряду при стисненні кварцу.

Тензометричний – наклеюється на трубу.

Ємнісні – прогин мембрани, яка є однією з обкладинок конденсатора, призводить до зміни ємності.

Скляні рідинні манометри–для вимірювання невеликих тисків (до 0,1…0.15МПа) в яких робочою рідиною служить, як правило, дистильована вода, або спирт.

Температура – це один з найважливіших параметрів стану системи. Вона характеризує ступінь нагрітості тіла, пов'язаний з кінетичною енергією руху його частинок.

Для ідеального газу згідно молекулярно – кінетичної теорії

$$T = 2/3\kappa \cdot mc^2/2, \qquad (1.7)$$

де T – абсолютна температура,

κ – константа Больцмана;

$mc^2/2$ – середня кінетична енергія поступального руху молекул.

Практично кінетичну енергію виміряти неможливо, тому для вимірювання температури застосовують прилади, дія яких заснована на використанні термометричних властивостей газів, рідин, та твердих тіл.

В техніці для вимірювання температур використовують різні властивості тіл: розширення тіл від нагрівання в рідинних термометрах; зміну об'єму при постійному тиску або зміну тиску при сталому об'ємі в газових термометрах; зміну електричного опору провідника при нагріванні в термометрах опору; зміну електрорушійної сили в ланцюзі термопари при нагріванні або охолодженні її спаю.

Передбачено використання двох температурних шкал: термодинамічної температурної шкали, заснованої на другому законі термодинаміки, і міжнародної практичної температурної шкали, яка є практичним здійсненням термодинамічної температурної шкали за допомогою реперних точок.

Вимірювання температур в кожній із цих шкал може відбуватися як в Кельвінах (К), так і в градусах Цельсія (^{0}С) в залежності від прийнятого початку відліку (положення нуля) по шкалі.

В так званій потрійній точці води, тобто в точці, де рідка, пароподібна і тверда фази знаходяться в стійкій рівновазі, температура в Кельвінах дорівнює 273,16 К, а в градусах Цельсія 0,01^0 С.

Отже, між температурами, які виражені в Кельвінах і градусах Цельсія, є наступне співвідношення:

$$T\ \text{K} = t^0\text{C} + 273{,}16 \qquad (1.8)$$

Параметром стану є **абсолютна температура**, яка вимірюється в Кельвінах. Один Кельвін абсолютної шкали чисельно дорівнює градусу шкали Цельсія, так що $dT = dt$, тому 1 К = 1 ^{0}С.

Своєрідними «охоронцями» МПТШ є постійні температури фазової рівноваги між двома або трьома фазами чистої речовини – реперні точки (табл.1.1).

Замість основних реперних точок в МПТШ-68 зафіксовано і 30 вторинних точок, що дозволяють фіксувати температурний інтервал від 13,81К до 6300 К.

В практиці теплотехнічних вимірювань застосовують такі прилади:

- скляні рідинні термометри;
- термоелектричні термометри (термопари);
- термометри опору;
- фотоелектричні пірометри;

Будь-який термометр фіксує свою власну температуру і тому, при зміні температури необхідно забезпечити термічну рівновагу між термометром і досліджуваною системою (газом, рідиною, твердим тілом), тобто усунути або врахувати похибки приладів.

Таблиця 1.1 – Основні реперні точки МПТШ – 68

Рівноважний стан	*T*, К	*t*, ^{0}C
Потрійна точка врівноваженого водню	13,81	-259,34
Точка кипіння врівноваженого водню при тиску 33,380 кПа (259 мм. рт.ст.)	17,042	-256,108
Точка кипіння врівноваженого водню	20,28	-252,87
Точка кипіння врівноваженого неону	27,102	-246,048
Потрійна точка кисню	54,361	-218,789
Точка кипіння кисню	90,188	-182,962
Потрійна точка води	273,16	0,01
Точка кипіння води	373,15	100
Точка затвердіння цинку	692,73	419,58
Точка затвердіння срібла	1235,08	961,93
Точка затвердіння золота	1337,58	1064,43

Прилади для вимірювання температури

Скляні термометри. Принцип дії скляних рідинних термометрів заснований на різниці теплового розширення термометричної рідини і скляної оболонки термометра, в якій вона знаходиться. Такі термометри застосовуються для вимірювання температур в інтервалі від –200^{0}С до +750^{0}С. Хоча для заповнення рідинних термометрів використовуються різноманітні рідини, але найбільше поширення одержали очищені ртуть і спирт.

Серед ртутних термометрів, що випускає промисловість, в лабораторіях можуть знайти застосування термометри для точних вимірювань і так звані лабораторні термометри.

Термометри для точних вимірювань випускають для вимірювання температур в інтервалі від 0^{0}С до 500^{0}С; ціна поділок і похибок вимірювань коливаються для різних термометрів від 0,01 до 0,1 ^{0}С:

от 0 ^{0}С до 60 ^{0}С…….0,01 ^{0}С
от 55 ^{0}С до 155 ^{0}С…….0,02 ^{0}С
от 140 ^{0}С до 300 ^{0}С……...0,05 ^{0}С
от 300 ^{0}С до 500 ^{0}С……0,1^{0}С.

Лабораторні термометри змінюють температуру від -30 ^{0}С до +600 ^{0}С з похибкою від 0,2 ^{0}С до 6 ^{0}С:

Термоелектричні термометри. Термоелектричні термометри (термопари) одержали виключно широке поширення як в лабораторній практиці, так і в промисловості.

Термопара представляє собою два різнорідних провідника (проволоки різного матеріалу), що складають загальний електричний ланцюг (рис. 1.4). Якщо температури місць сполучення (спаювання) провідників t і t_o неоднакові, то виникає термо-ЕРС і по ланцюгу протікає струм. Термо-ЕРС тим більше, чим більша різниця температур спаювання. При цьому температура в проміжних точках провідників не чинить впливу на значення ЕРС, якщо

провідники однорідні. По термо-ЕРС роблять висновки про температуру спаювання.

Основне правило роботи з термопарами полягає в наступному: якщо в ланцюг термопари включається який-небудь третій однорідний провідник, кінці якого мають однакову температуру, це не впливає на виникаючу термо-ЕДС. Останнє дає можливість включати в ланцюг термопар пристрій, що вимірює термо-ЕДС (додаток 2).

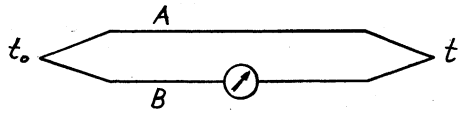


Рисунок 1.4 – Термоелектричний ланцюг,
що складається із двох різнорідних провідників

Електродами термопари служить проволока діаметром 0,1-3,2 мм.

В лабораторній практиці знайшли застосування такі термопари:

Платинородій-платинова термопара. Матеріалом одного електрода цієї термопари є сплав платини (90%) і родія (10%), другої – чиста платина. Така термопара є робочим еталоном, що відтворює одиницю температури – кельвін – в інтервалі від 630,74 ^{0}C до 1064,43 ^{0}C. Платинородій-платинова термопара використовується для вимірювання температури в інтервалі від 0^{0}C до 1300 ^{0}C, а короткочасно – до 1600 ^{0}C.

Платинородієва термопара. Матеріал одного електрода цієї термопари – платинородій – сплав зі вмістом 30% родія, а матеріал другого електрода – платинородій – з вмістом 6% родія. Такі термопари застосовуються для вимірювання температур від 300 ^{0}C до 1600 ^{0}C (короткочасно – до 1800 ^{0}C).

Вольфрам-ренієва термопара. Електроди цієї термопари виготовлені зі сплаву вольфраму і ренію.

Хромель-алюмелєва (ТХА) і хромель-копелєва (ТХК) термопари застосовують для вимірювань температури в інтервалі від 100 ^{0}C до 1300 ^{0}C.

На практиці термо-ЕРС термопари вимірюється прямим методом за допомогою мілівольтметра або компенсаційним методом (порівняння) за допомогою потенціометра.

Термометр опору. Самий точний в інтервалі 13,81К до 903,89К. Ефект збільшення опору платинової проволоки з підвищенням температури.

Фотоелектричний пірометр. Для вимірювання високих температур зазвичай приймають пірометри. Принцип дії пірометрів заснований на формулі Планка – залежності спектральної густини енергії випромінювання чорного тіла від температури і довжини хвилі

В якості третього параметра стану є питомий об’єм:

Питомий об’єм v – це відношення об’єму V до маси m

$$v = V/m, \text{ м}^3/\text{кг}, \tag{1.9}$$

який отримуємо шляхом розподілу об'єму системи V на її масу m. На відміну від екстенсивних величин V і m, питомий об'єм υ (м^3/кг) однаковий для будь-якої частини врівноваженої гомогенної системи.

Величина, зворотна питомому об'єму, тобто відношення маси до об'єму, називається густиною

$$\rho = m/V \text{ , кг/м}^3. \tag{1.10}$$

Відповідно $\rho \cdot v = 1$.

Рівняння стану ідеального газу (рівняння Менделєєва-Клапейрона), що пов'язує між собою основні параметри ідеального газу p, V, і T має вигляд:

$$p \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot R_\mu \cdot T \ , \tag{1.11}$$

де p – абсолютний тиск, Па;

V – об'єм ідеального газу, м^3;

m – маса газу, кг;

T – термодинамічна температура газу, К;

μ – молярна маса газу, кг/моль.

R_μ – універсальна газова стала для ідеального газу дорівнює 8314,2 Дж/(кмоль·К);

При переході до питомих параметрів, згідно рівняння (1.9), співвідношення (1.11) перетвориться у наступне рівняння :

$$p \cdot \upsilon = R \cdot T \, , \tag{1.12}$$

де $R = (R_\mu/\mu)$ – питома газова стала, Дж/(кг·К).

1.3. Лабораторна установка

Лабораторна установка (рис. 1.5) складається з вентилятора 2, привід якого здійснюється від електродвигуна 1. На всмоктуючому боці повітропровода встановлені витратомір 5 і дросельна заслінка 3, на нагнітаючому боці – повітропровід 9. Розрідження і надлишковий тиск вимірюється манометрами 4 і 10.

Порядок проведення роботи

1. Увімкнути електродвигун 1, дочекатись, поки вентилятор 2 буде обертатись із сталим числом обертів.

2. За допомогою заслінки 3 встановити необхідне розрідження і записати показання манометрів 4 і 10. За допомогою барометра виміряти атмосферний тиск.

3. Вимкнути електродвигун 1.

4. Перевести в систему СІ показання виміряних величин.

5. Розрахувати абсолютний тиск. Результати вимірювань і розрахунків внести до протоколу випробувань.

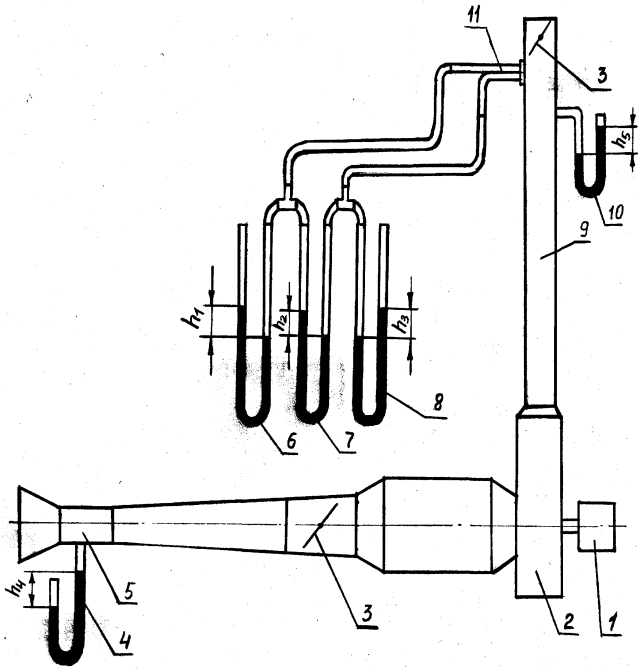


Рисунок 1.5 – Принципова схема лабораторної установки
для вимірювання тиску

Протокол випробувань

Параметр	Ат.	мм. рт. ст	мм. вод.ст.	Па	кПа	МПа	Бар
Атмосферний тиск, В							
Надлишковий тиск, $p_{над.}$							
Розрідження, $p_{вак.}$							
Абсолютний тиск, $p^{н}_{абс.}$							
Абсолютний тиск, $p^{в}_{абс.}$							

1.4 Контрольні запитання

1. Які параметри стану Ви знаєте?
2. Тиск: одиниці вимірювання, принцип дії манометра.
3. Температура: одиниці вимірювання, принцип дії термопари.
4. Міжнародна практична температурна шкала (МПТШ-68).
5. Види термометрів, принцип їх дії і забезпечення мінімальних похибок вимірювання.
6. Визначення питомого об’єму газу і рідини, одиниці вимірювання.
7. Рівняння стану ідеального газу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА АДІАБАТИ ПОВІТРЯ

2.1. Мета роботи

Поглиблення знань з теорії дослідження термодинамічних процесів, ознайомлення з методикою дослідного визначення показника адіабати газів.

2.2. Загальні відомості

Для дослідження термодинамічних процесів, що характеризують зміну стану робочого тіла (газу або пари), використовується ряд основних положень технічної термодинаміки. Перший закон термодинаміки формулюється так, що вся теплота, підведена до робочого тіла витрачається на зміну його внутрішньої енергії і здійснення роботи розширення проти сил зовнішнього тиску

$$\delta Q = dU + \delta L, \tag{2.1}$$

рівняння стану робочого тіла

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T, \tag{2.2}$$

де p – абсолютний тиск, Па;

V – об’єм, який займає робоче тіло, м^3;

T – абсолютна температура, К;

m – маса газу, кг;

R – питома газова стала, Дж/(кг·К);

Залежність, що описує всі термодинамічні процеси записана через p і V параметри, має вигляд

$$pV^n = \text{const}, \tag{2.3}$$

Рівняння (2.3) називається рівнянням політропи або політропного процесу, а n – показник політропи.

Показник політропи може приймати різні значення (від –∞ до + ∞) і його величина буде відповідати відомим термодинамічним процесам, характеристики яких наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики основних термодинамічних процесів

Найменування процесу	Рівняння процесу	Показник політропи	Рівняння першого закону термодинаміки	Значення теплоємності, Дж/кгК	Значення ентропії, Дж/кгК
Політропний	$pV^n - \text{const}$	n	$\delta Q = dU + \delta L$	$C = C_n$	$\Delta S = C_n \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$
Ізохорний	$V - \text{const}$	$n = \pm\infty$	$\delta Q = dU$	$C = C_v$	$\Delta S = C_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$
Ізобарний	$p - \text{const}$	$n = 0$	$\delta Q = dU + \delta L$	$C = C_p$	$\Delta S = C_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$
Ізотермічний	$T - \text{const}$	$n = 1$	$\delta Q = \delta L$	$C = \infty$	$\Delta S = R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$
Адіабатний (ізоентропійний)	$pV^\kappa - \text{const}$	$n = \text{к}$	$\delta Q = 0$ $\delta L = -dU$	$C = 0$	$\Delta S = 0$

На рис. 2.1. представлено зображення основних термодинамічних процесів у $p-V$ і $T-S$ координатах, які описуються віповідними рівняннями табл. 2.1

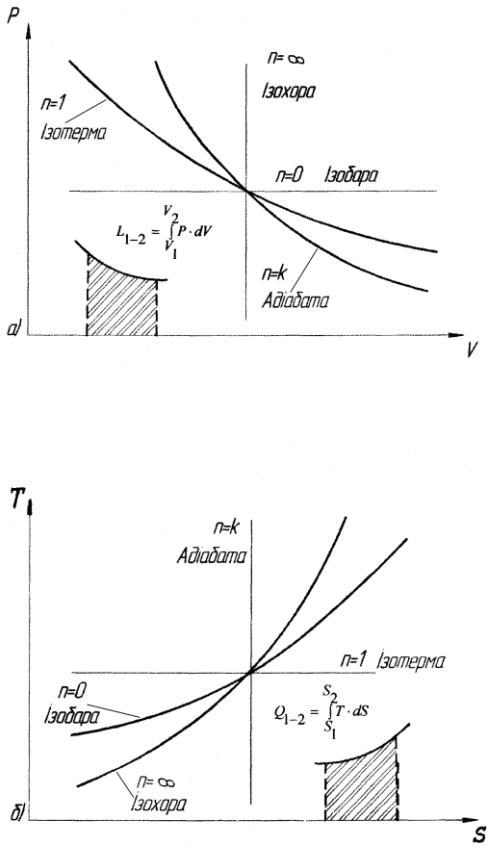


Рисунок 2.1 – Зображення термодинамічних процесів у *p*-*V* і *T*-*S* координатах

Робота розширення в термодинамічному процесі визначається за виразом

$$\delta L = p \cdot dV \text{, Дж,} \tag{2.4}$$

тоді величина виконаної робочим тілом роботи може бути визначена в $p - V$ діаграмі як площа під кривою термодинамічного процесу 1-2, тобто:

$$L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV \text{, Дж .} \tag{2.5}$$

Для визначення кількості теплоти, підведеної до робочого тіла, використовується параметр стану – ентропія *S*, Дж/кгК:

$$dS = \delta Q / T \text{, Дж/кг·К.} \tag{2.6}$$

Таким чином, застосовуючи $T - S$ діаграму, можна визначити кількість теплоти, переданої робочому тілу, як площу під кривою термодинамічного процесу 1-2

$$Q_{1-2} = \int_{S_1}^{S_2} T \cdot dS \text{, Дж .} \tag{2.7}$$

Найчастіше на практиці термодинамічних процесів зустрічається адіабатний процес.

Адіабатним процесом називається термодинамічний процес зміни стану робочого тіла, що відбувається без обміну теплоти з навколишнім середовищем $(\delta Q = 0)$.

У цьому випадку, робота розширення відбувається за рахунок зміни внутрішньої енергії робочого тіла ($\delta L = -dU$).

Рівняння адіабатного процесу має вигляд

$$p \cdot V^k = \text{const}, \tag{2.8}$$

де k показник адіабатиь, який дорівнює відношенню ізобарної теплоємності C_p до ізохорної C_v

$$k = \frac{C_p}{C_v} \geq 1 \tag{2.9}$$

Чисельне значення показника адіабати для ідеального газу можна одержати, виходячи з молекулярно-кінетичної теорії газів:

для одноатомного газу

$$k = \frac{C_{\mu_p}}{C_{\mu_v}} = \frac{5/2\, R_\mu}{3/2\, R_\mu} = 1{,}66, \tag{2.10}$$

для двоатомного газу

$$k = \frac{C_{\mu_p}}{C_{\mu_v}} = \frac{7/2\,R_\mu}{5/2\,R_\mu} = 1{,}44, \tag{2.11}$$

для багатоатомного газу

$$k = \frac{C_{\mu_p}}{C_{\mu_v}} = \frac{8/2\,R_\mu}{6/2\,R_\mu} = 1{,}33. \tag{2.12}$$

З рівнянь (2.10),(2.11),(2.12) видно, що для ідеальних газів величина k є постійною, що не залежить від параметрів стану газу.

Зв'язок між ізобарною і ізохорною теплоємностями встановлює рівняння Майєра

$$C_p - C_v = R. \tag{2.13}$$

Виразивши з (2.13) $C_p = C_v + R$, формулу можна привести до виду

$$k = C_p / C_v = (C_v + R)/C_v = 1 + R/C_v. \tag{2.14}$$

Оскільки для реальних газів теплоємність C_v, зростає зі збільшенням температури інтенсивніше, ніж C_p, то значення k зі збільшенням температури зменшується. Величина k для реальних газів однієї атомності за інших рівних умов має відмінності. Так, наприклад, для двоатомних газів: водень $k = 1{,}41$; азот $k = 1{,}404$; повітря $k = 1{,}4$.

Основні характеристики адіабатного процесу можна визначити, знаючи чисельне значення показника адіабати (табл. 2.2).

Припустимо, що умови досліду з достатнім ступенем точності задовільняють рівнянню стану ідеального газу

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T. \tag{2.15}$$

Представимо сосуд, заповнений газом, що має параметри: тиск p_1 і температуру T_1, які перевищують параметри навколишнього середовища.

Таблиця 2.2 – Основні характеристики адіабатного процесу

№ п/п	Характеристика	Рівняння
1.	Зв'язок між тиском та температурою	$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{k-1/k}$
2.	Зв'язок між тиском та об'ємом	$P_2/P_1 = (V_1/V_2)^k$
3.	Зв'язок між об'ємом та температурою	$T_2/T_1 = (V_1/V_2)^{k-1}$
4.	Робота розширення	$L_{1-2} = RT/k - 1 \cdot (1 - (V_1/V_2)^{k-1})$
5.	Теплоємність	$C_{1-2} = 0$

За рахунок охолодження стінок сосуда навколишнім середовищем і відведення якоїсь кількості теплоти q_1, температура газу дорівнюватиме температурі навколишнього середовища – T_2, а тиск знизиться до якогось значення p_2 (процес 1-2 рис. 2.2). Потім швидко випустимо газ із сосуда, дотримуючи тим самим умови адіабатного розширення – відсутність теплообміну з навколишнім середовищем. Наприкінці цього процесу (2-3) тиск у сосуді дорівнюватиме тиску навколишнього середовища p_3, а температура знизиться до T_3, меншої T_2. Закриємо сосуд і зачекаємо деякий час, від навколишнього середовища до більш холодного тіла буде підведена теплота q_2 (процес 3-4). У результаті температура зросте до температури навколишнього середовища $(T_4 = T_2)$, а тиск підвищиться до якогось значення p_4.

Розглянемо умовний ізотермічний процес 2-4. Для ізотермічного процесу рівняння має вигляд

$$T = \text{const}. \tag{2.16}$$

Тоді

$$V_2/V_4 = p_4/p_2 . \tag{2.17}$$

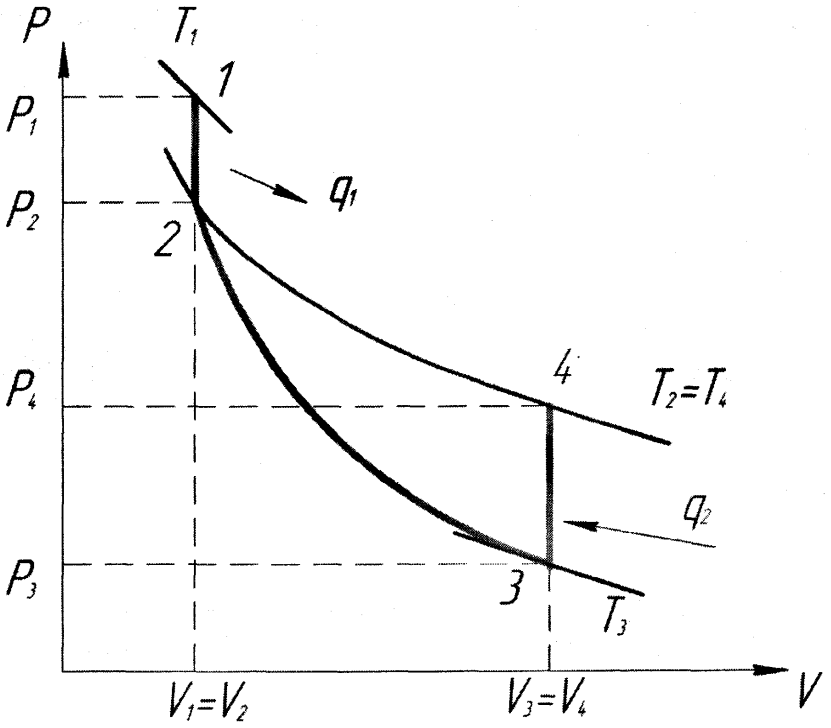


Рисунок 2.2 – До визначення показника адіабати газу

Якщо $V_3 = V_4$, тоді

$$V_2/V_3 = p_3/p_2 \tag{2.18}$$

Використовуючи рівняння адіабатного процесу

$$p \cdot V^k = \text{const}. \tag{2.19}$$

Можна записати

$$p_3 / p_2 = (V_2 / V_3)^{\kappa}, \tag{2.20}$$

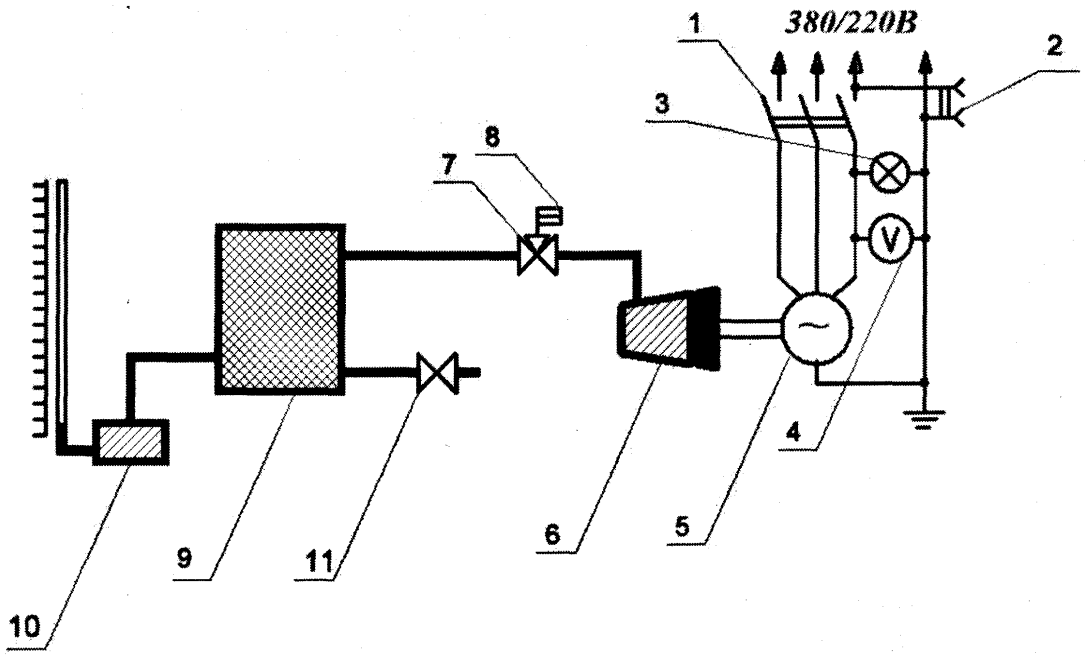
Прологарифмувавши вираз (2.20), одержимо

$$k = \ln \frac{p_3}{p_2} \Big/ \ln \frac{V_2}{V_3} = \ln \frac{p_3}{p_2} \Big/ \ln \frac{p_4}{p_2} \ . \tag{2.21}$$

Формула (2.21) буде надалі використовуватись при обробці результатів.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка (рис. 2.3) складається з ресивера 9, в якому за допомогою компресора 6 створюється надлишковий тиск, який вимірюється манометром 10. На лінії нагнітання від компресора до ресивера розташований триходовий кран 7. Випуск стисненого повітря з ресивера відбувається через кран 11. Привід компресора здійснюється від електродвигуна 5, що живиться трифазним струмом. Силова мережа має індивідуальні вимикачі фаз 1.



1 – вимикач; 2 – розетка 220 В; 3 – сигнальна лампа; 4 – вольтметр;
5 – електродвигун; 6 – ротаційний компресор; 7 – триходовий кран;
8 – вихлоп в атмосферу; 9 – ресивер; 10 – рідинний манометр; 11 – кран

Рисунок 2.3 – Схема експериментальної установки

Для індикації напруги кожної фази передбачений вольтметр 4 і сигнальна лампа 3. Установка обладнана розеткою 220 В змінного струму 2. Триходовий кран 7 у роботі займає два положення. В одному з них відбувається нагнітання повітря в ресивер 9, у другому – стиснене повітря з компресора 6 надходить в атмосферу, при цьому ресивер 9 відключається від нагнітальної лінії.

Порядок проведення роботи

1. Почерговим увімкненням кожного з вимикачів за показаннями вольтметра перевірити напругу кожної фази. Дослід забороняється проводити, якщо відсутня напруга хоча б однієї фази.

2. Переконатися за показаннями манометра, що в ресивері немає надлишкового тиску. У протилежному випадку випустити з ресивера повітря через кран 11.

3. Перекрити кран 11. Кран 7 поставити в положення, при якому стиснене повітря з компресора 6 буде надходити в ресивер 9.

4. Увімкнути одночасно трьома вимикачами електродвигун 5 і, спостерігаючи за показанням манометра 10, закачати повітря в ресивер 9 до тиску, необхідного в досліді ($p_{\text{над.1}}$).

5. По досягненні заданого тиску поворотом крана 7 направити повітряний потік від компресора 6 в атмосферу. Вимкнути електродвигун 5.

6. Почекавши 5-7 хвилин, необхідних для охолодження стисненого повітря до температури навколишнього середовища (про настання цього моменту буде свідчити стале показання манометра), записати значення тиску $p_{\text{над.2}}$ до протоколу.

7. Відкрити кран 11 на час не більше 2 секунд і випустити стиснене повітря з ресивера 9 в атмосферу. При цьому $p_{\text{над..3}}$ стане рівним нулю. Закрити кран.11

8. Після 5-7 хвилин поки нагріється повітря, яке охолонуло при адіабатному розширенні до температури навколишнього середовища, занести значення тиску $p_{\text{над.4}}$ до протоколу.

9. Кожна серія дослідів виконується 4 рази для різних початкових тисків (згідно п.п. 2-8), які задаються викладачем, або приймаються рівними 800, 700 і 600 мм. вод. ст. (близько 8, 7 і 6 кПа відповідно). Загальна кількість дослідів дорівнює 10.

Обробка отриманих даних

1. Визначити абсолютний тиск повітря ($p_{\text{абс.п}}$) на початку ізохорного процесу зниження тиску (p_1) з відведенням теплоти, на початку адіабатного розширення (p_2), на початку й наприкінці ізохорного підвищення тиску (p_3 і p_4) з підведенням теплоти за наступною формулою

$$p_{\text{абс.п}} = p_{\text{над.}} \cdot g + p_{\text{бар}}, \text{ Па}, \qquad (2.22)$$

де $p_{\text{бар}}$ – барометричний тиск, Па, за показаннями лабораторного барометру;

$g = 9{,}81$ – прискорення вільного падіння, м/с^2;

$p_{\text{над.}}$ – надлишковий тиск, мм. вод. ст.

2. Розрахувати значення показника адіабати k по (2.21). Причому, приймаючи $p_3 = p_{\text{бар}}$, і використовуючи вираз (2.22), значення k можна визначити за наступною формулою

$$k = \frac{\ln p_3 / p_2}{\ln p_4 / p_2} \ . \qquad (2.23)$$

3. Визначити середнє значення показника адіабати повітря для серії проведених дослідів

$$\bar{k} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} k_i \ , \qquad (2.24)$$

де n – кількість дослідів.

4. Визначення відхилення кожного досліду

$$\Delta k_1 = \left| k_i - \bar{k} \right| . \qquad (2.25)$$

5. Розрахувати дійсну похибку експерименту

$$\sigma_д = \pm \left| \left(k_0 - \bar{k} \right) / k_0 \right| \cdot 100, \% \ , \qquad (2.26)$$

де $k_0 = 1{,}4$ − відоме загальноприйняте значення показника адіабати повітря.

2.3. Контрольні запитання

1. Чому дорівнює показник адіабати?
2. Які чисельні значення k для газів різної атомності?
3. Від яких параметрів стану ідеального і реального газів залежить k?
4. Як впливає температура на значення k ідеального і реального газів?
5. Як записується рівняння адіабатного процесу?
6. Якими залежностями пов’язані між собою k, C_p, C_v?
7. Як записується рівняння Майєра?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВОДЯНОЇ ПАРИ

3.1. Мета роботи

Вивчити властивості водяної пари, методи визначення її параметрів, навчитися користуватися таблицями та діаграмами водяної пари для розрахунку термодинамічних процесів.

3.2. Загальні відомості

Пара – реальний газ, який не підлягає закономірностям ідеального газу, і тому розрахунки процесів, що здійснюються з водяною парою, зручно проводити за допомогою таблиць і діаграм.

Розглядаємо пароутворення у вільному просторі, тому процес ізобарний, тобто P = const.

Процес одержання пари складається із наступних етапів: нагрівання води до температури кипіння, пароутворення (кипіння) при температурі насичення і перегріву.

При кипінні утворюється волога пара, що являє собою суміш сухої насиченої пари з найдрібнішими краплями води. Волога пара характеризується ступенем сухості X – відношенням маси сухої насиченої пари $m_{\text{с.п.}}$ до маси вологої пари $m_{\text{в.п.}}$

$$X = m_{\text{с.п.}} / m_{\text{в.п.}} . \qquad (3.1)$$

Ступінь сухості змінюється від 0 (початок кипіння) до 1 (суха насчиена пара).

В процесі кипіння при p = const температура киплячої рідини і пари, що утворюється, рівні і залишаються незмінними, тобто процес кипіння є ізобарно-ізотермічним. Температура, при якій здійснюється процес кипіння, називається температурою насичення $t_{\text{н}}$. Чим вище тиск, тим більше температура насичення $t_{\text{н}}$. Теплота, що витрачається на перетворення 1 кг води, нагрітої до температури насичення $t_{\text{н}}$, в суху насичену пару при сталому тиску (і сталій температурі) називається питомою теплотою пароутворення, r, Дж/кг.

При підведенні теплоти до сухої насиченої пари температура її збільшується і стає вищою за температуру насичення $t_{\text{н}}$. Така пара називається перегрітою, а її температура – температурою перегріву пари $t_{\text{п.п.}}$.

Термодинамічні властивості води і водяної пари характеризуються параметрами: тиском, температурою насичення, питомим об’ємом, ентальпією, ентропією.

Загальноприйняті наступні умовні позначення: для води у початковий момент кипіння – індекс штрих (v', h', s'), для сухої насиченої пари – два штриха (v'', h'', s''), вологої пари – індекс x (vx, hx, sx).

Термодинамічні властивості води і водяної пари приводяться в спеціальних таблицях (додаток 8, 9,10) і дозволяють виконувати всі необхідні розрахунки, пов'язані із застосуванням водяної пари.

Формули для розрахунку параметрів води і водяної пари наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Формули для розрахунку параметрів води і водяної пари

Величина	Вода	Пара		
		Волога	суха	перегріта
Ентальпія, кДж/кг	$h' = C_{\text{ррід}} t_{\text{н}}$	$h_x = h' + xr = (1-x)h' + xh''$	$h'' = h' + r$	$h_{\text{п.п.}} = h'' + C_{\text{рп}} t_{\text{пп}}$
Питомий об'єм, м^3/кг	v′	$v_x = v''x + (1-x)v'$	v″	$v_{\text{пп}}$
Ентропія	$s' \cong C_{\text{рв}} \ln \frac{T_{\text{н}}}{273}$	$s_x = s' + rx/T_{\text{н}}$	$s'' = s' + r/T_{\text{н}}$	$s_{\text{пп}} = s'' + C_{\text{рн}} \ln \frac{T_{\text{пп}}}{T_{\text{н}}}$

Діаграма *hs*, в якій теплота, ентальпія і ентропія вимірюються лінійними відрізками, застосовується для розрахунку термодинамічних процесів водяної пари. На осі абсцис діаграми (рис. 3.1) відкладені значення питомої ентропії *s*, а по осі ординат – питомої ентальпії *h*. На діаграмі нанесені нижня (x = 0) і верхня (x = 1) пограничні криві.

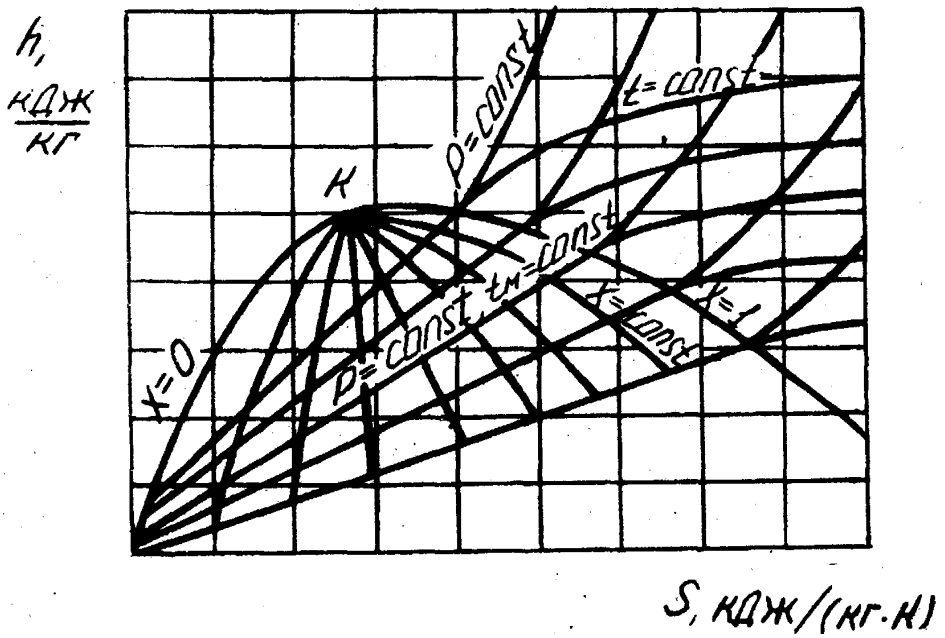


Рисунок 3.1 – Загальний вид *hs* – діаграми водяної пари

Між пограничними кривими знаходяться ділянки вологої пари, вище верхньої пограничної кривої – ділянка перегрітої пари. На ділянці вологої пари, починаючи від нижньої пограничної кривої x = 0, проходить лінія p = const, а з критичної точки *K* – пучок кривих x = const. Через те, що температура кипіння

залежить тільки від тиску, на ділянці вологої пари ізотерми співпадають з ізобарами. На ділянці перегрітої пари, починаючи від верхньої пограничної кривої (x = 1), ізобари піднімаються вгору логарифмічними кривими, а ізотерми направлені вправо. На діаграмі нанесені також штрихпунктирними лініями ізохори $v = \text{const}$. Побудова термодинамічних процесів здійснюється по лініях: ізохорний – за ізохорою $v = \text{const}$, ізобарний – p = const, ізотермічний – t = const, адіабатний – s = const, ізоентальпійний – h = const. Для побудови процесу необхідно знати два початкових і один кінцевий параметр. Точки початку і кінця процесу знаходяться на перетині відповідних кривих (наприклад, ізобари p та ізотерми t – початок процесу; ізобара і ступінь сухості x – для кінця процесу).

Розрахункові співвідношення для обчислення зовнішньої роботи, кількості теплоти і зміни внутрішньої енергії в термодинамічних процесах водяної пари наведені в табл. 4.2.

Таблиця 3.2 – Розрахункові співвідношення для обчислення роботи, теплоти і зміни внутрішньої енергії

Процес	Зміна внутрішньої енергії	Кількість	
		роботи	теплоти
Ізохорний	$\Delta u_v = h_2 - h_1 - v(p_2 - p_1)$	$l_v = 0$	$q_v = \Delta u$
Ізобарний	$\Delta u_p = h_2 - h_1 - p(v_2 - v_1)$	$l_p = q - \Delta v_p$	$q_p = \Delta h$
Ізотермічний	$\Delta u_T = (h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1)$	$l_T = q - \Delta u_1$	$q_T = T(s_2 - s_1)$
Адіабатний	$\Delta u_s = (h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1)$	$l_s = -\Delta u$	$q_s = 0$

Завдання для самостійної роботи

Завдання 1. Використовуючи таблиці (додаток 8, 9, 10) і діаграму водяної пари (додаток 11), визначити вид пари, питомий об’єм, ентальпію, ентропію і внутрішню енергію, якщо відомі тиск p та температура t, значення яких вказані в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Вихідні дані до завдання 1

Пара-метр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P, МПа	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	3,0	3,2	3,4	4,0	4,2	4,4	3,0	3,2
t_1, ^{0}C	250	280	260	300	290	310	320	330	260	350	360	340	400	300	320

Завдання 2. Умови тіж, що і в завданні 1, але тиск p і ступінь вологості (100-x) %, значення яких вкзані в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Вихідні дані до завдання 2

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
p, МПа	0,3	0,5	0,1	0,1	1,2	1,6	1,8	2,0	2,4	3,0	3,4	4,0	0,9	4,4	2,8
(100-x), %	15	20	25	20	10	5	20	19	10	18	15	5	25	15	10

3.3. Контрольні запитання

1. Що називається пароутворенням, випаровуванням, кипінням, конденсацією?
2. Опишіть процес одержання перегрітої пари і проілюструйте його за допомогою *p*-*V* – діаграми водяної пари.
3. Яку пару називають вологою насиченою, сухою насиченою та перегрітою?
4. Що таке критична точка?
5. Що таке теплота пароутворення, конденсації? Їх визначення.
6. Що таке ступінь сухості? Як визначаються питомий об'єм, ентальпія і внутрішня енергія вологої пари?
7. Як зображаються основні термодинамічні процеси водяної пари на *p*-*V* і *T*-*S* –діаграмах?
8. В чому особливість розрахунку ізотермічного процесу водяної пари у порівнянні з ідеальним газом?
9. Зобразіть цикл Ренкіна в *p*-*V* і *T*-*S* -діаграмах і опишіть схему паросилової установки, в якій він здійснюється.
10. Як визначити термічний ККД і питому витрату пари в циклі Ренкіна?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ВИВЧЕННЯ РОБОТИ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕСОРА

4.1. Мета роботи

Дослідження характеристик одноступінчастого поршневого компресора, аналіз термодинамічних процесів, що відбуваються при стисненні робочої речовини (повітря).

4.2. Загальні відомості

Компресор – це теплотехнічний пристрій, призначений для підвищення тиску, стиснення і переміщення газів або пари.

Компресори можна класифікувати в такий спосіб:

а) компресори об'ємного статичного тиску, в яких підвищення тиску відбувається за рахунок зменшення обсягу робочої речовини, що нагнітається в спеціальний резервуар (ресивер);

б) компресори динамічного стиснення, в яких робоча речовина безупинно переміщується через проточну частину компресора, при цьому кінетична енергія потоку перетворюється в потенційну, забезпечуючи відповідне збільшення тиску середовища.

До найпоширеніших компресорів об'ємного стиснення відносяться: поршневі, гвинтові, ротаційні. Як компресори динамічного стиснення, застосовують відцентрові й осьові вентилятори, турбокомпресори, ежектори і віхрові машини.

На рис. 4.1 представлена теоретична діаграма роботи найпростішого одноступінчастого поршневого компресора.

Основними елементами поршневого компресора є: циліндр, поршень, кривошипно шатунний механізм, впускний і нагнітальний клапани.

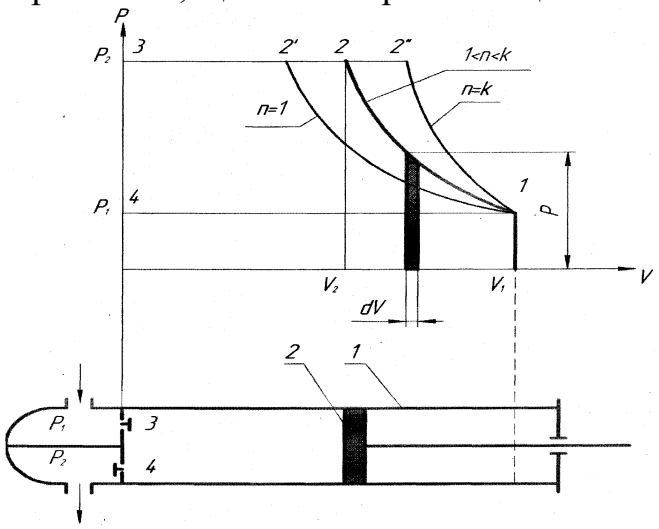
Робочий процес компресора здійснюється за один оборот валу або два хода поршня. Зворотно-поступальний рух поршня в сполученні з роботою клапанної групи забезпечує протікання наступних робочих процесів (рис. 4.1):

а) процес всмоктування 4-1 при повністю відкритому впускному клапані;

б) процес стиснення 1-2 при закритих клапанах;

в) процес нагнітання 2-3 при відкритому нагнітальному клапані;

г) процес розширення 3-4, що замикає робочий цикл компресора.



1 – циліндр; 2 – поршень; 3 – впускний клапан; 4 – нагнітальний клапан

Рисунок 4.1 –Теоретична діаграма роботи поршневого одноступінчастого компресора

Робота, яка витрачається в компресорі на одержання 1 кг стиснутої робочої речовини визначається наступним виразом

$$L_k = L_{1-2} + L_{2-3} - L_{4-1}, \text{ Дж}, \tag{4.1}$$

де $L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} pdV$ – робота зміни об'єму.

$L_{2-3} - p_2 \cdot V_2$ – робота нагнітання.

$L_{4-1} = p_1 \cdot V_1$ – робота всмоктування.

Аналіз теоретичної діаграми *p*-*V* компресора (рис.4.1) показує, що для процесу стиснення можна використовувати ізотермічний, адіабатний і політропний процеси. Стиснення в кожному з цих процесів дає різну величину площі витраченої роботи.

Величина роботи компресора визначається процесом стиснення. Теоретичний процес стиснення залежно від теплообміну між робочим тілом і стінками циліндра може відбуватися по ізотермі 1-2′, при цьому:

$$L_k = R \cdot T_1 \cdot \ln p_1 / p_2 \tag{4.2}$$

по адіабаті 1-2″:

$$L_k = \frac{kRT_1}{k-1}\left[\left(p_2/p_1\right)^{k-1/k} - 1\right] \tag{4.3}$$

по політропі 1-2:

$$L_k = \frac{nRT_1}{n-1}\left[\left(p_2/p_1\right)^{n-1/n} - 1\right] \tag{4.4}$$

Ізотермічний процес стиснення 1-2′ характеризується мінімально витраченою роботою, що перетворюється в теплоту і відводиться від робочого тіла, що стискається. Такий процес прийнято вважати ідеальним. Реально ж на практиці його неможливо здійснити.

Адіабатний процес стиснення 1-2″ відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем, тому витрати роботи на його здійснення максимальні, а температура робочої речовини істотно зростає.

Зменшити роботу, яка витрачається на привід компресора можливо, якщо використовувати систему примусового охолодження циліндра компресора. У цьому випадку буде відбуватися політропний процес стиснення 1-2 (рис.4.1).

Реальні процеси стиснення відрізняються від теоретичних в результаті дії наступних факотрів:

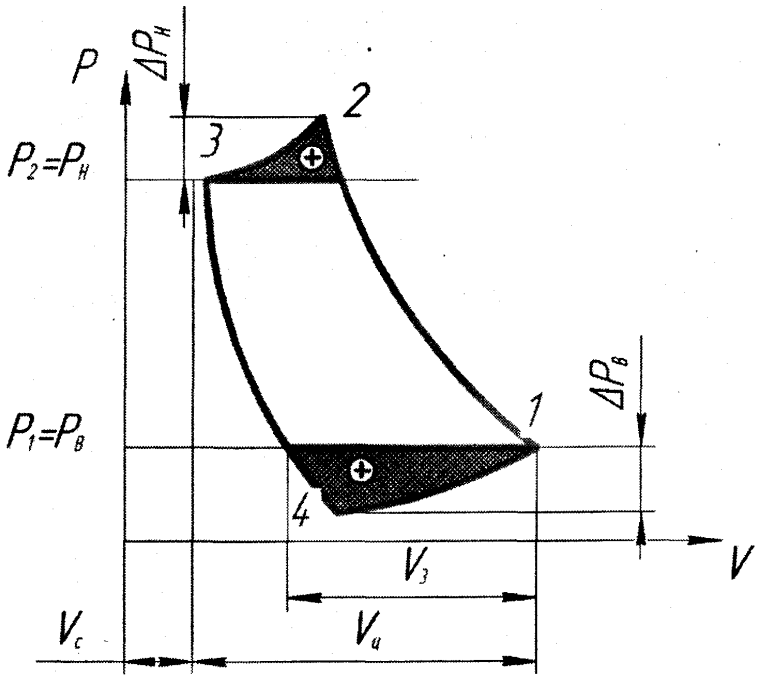
1. Наявності мертвого простору, що становить обсяг середовища V_c, що не піддається витисненню поршнем і, що розширюється при зворотному русі поршня (лінія 3-4, рис.4.2).

2. Наявності втрат тиску Δp у нагнітальному і випускному трактах, пульсацій тиску (лінія 3-4, рис. 4.2).

3. Перетікання робочої речовини через різні конструктивні зазори і ущільнення.

4. Витрати частини енергії на подолання тертя в механічних парах машини.

Вплив більшої частини перерахованих факторів враховується при побудові дійсної індикаторної діаграми роботи компресора (рис. 4.2).



$p_в$ – тиск всмоктування; $p_н$ – тиск нагнітання; $\Delta p_в$,
$\Delta p_н$ – втрати тиску в клапанах; $V_з$ – об'єм газу, що надходить у циліндр;
$V_ц$ – робочий об'єм циліндра; $V_с$ – шкідливий об'єм

Рисунок 4.2 – Дійсна індикаторна діаграма роботи компресора

До основних технічних характеристик компресора відносяться наступні показники.

Продуктивність компресора (об'ємна або масова) – це кількість робочої речовини, що проходить через компресор в одиницю чау

$$G_k = \rho \cdot V_ц \cdot \lambda_k \cdot n, \qquad (4.5)$$

де ρ – густина речовини, яка стискається, кг/м^3;

$V_ц$ – робочий об'єм цилідра компресора, м^3;

$\lambda_k = G_Д / G_T$ =0,6…0,85 – коефіцієнт подачі, що дорівнює відношенню дійсної продуктивності компресора до теоретичної;

n – частота обертання вала компресора, с$^{-1}$.

Теоретична потужність, витрачена на привід компресора

$$N_k = G_k \cdot L_k, \text{ Вт} \tag{4.6}$$

Ступінь підвищення тиску стисненого середовища

$$\beta = p_2 / p_1 \tag{4.7}$$

Для оцінки енергетичної досконалості компресора використовується ефективний ККД

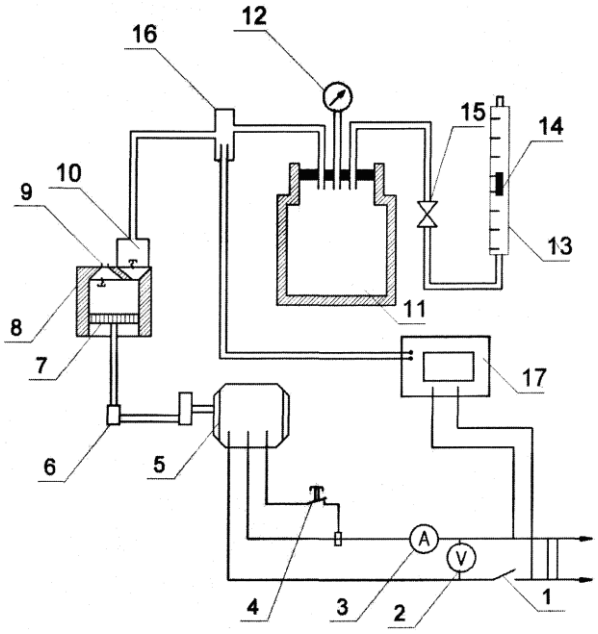
$$\eta_e = N^T_{\text{к.ад}} / N^Д_к , \tag{4.8}$$

де $N^T_{\text{к.ад}}$ – теоретична потужність компресора при адіабатному стисненні;

$N^Д_к$ – дійсна потужність приводу компресора.

Лабораторна установка

Для проведення дослідів використовується вертикальний одноциліндровий поршневий компресор. Схема експериментальної установки представлена на рис. 4.3. Стиснення повітря відбувається в циліндрі 8 при зворотно-поступальному русі поршня 7, що забезпечується механічною передачею, що включає кривошипно-шатунний механізм 6, який зв'язаний приводом з електродвигуном 5.



1 – мережний вимикач; 2 – вольтметр; 3 – амперметр; 4 – пускова кнопка; 5 – електродвигун; 6 – кривошипно-шатунний механізм; 7 – поршень; 8 – циліндр компресора; 9 – впускний клапан; 10 – нагнітальний клапан; 11 – резервуар; 12 – манометр; 13 – ротаметр; 14 – поплавець ротаметра; 15 – регулюючий вентиль; 16 – термопара; 17 – потенціометр

Рисунок 4.3 – Схема лабораторної установки

Всмоктування і нагнітання повітря відбувається через впускний 9 і нагнітальний 10 клапани, які розташовані на кришці циліндра.

Стиснене у компресорі повітря подається в резервуар 11. Тиск повітря контролюється манометром 12, а його температура вимірюється термопарою 16, а величина фіксується потенціометром 17. Продуктивність компресора визначається з показань ротаметра 13 – градуйованої трубки, всередині якої перебуває поплавець 14. Стиснене повітря з резервуара випускається через регулюючий вентиль 15 і ротаметр 13. Для визначення потужності, яку споживає електродвигун 5, що приводить у дію компресор, у ланцюг живлення включений ампертметр 3 і вольтметр 2. Мережний вимикач 1 і пускова кнопка 4 призначені для запуску компресора в роботу.

Порядок проведення роботи

Перед початком досліду необхідно зняти показання з лабораторних приладів: температуру навколишнього середовища та атмосферний тиск повітря.

1. Відкрити повністю вентиль 15 на 1-2 хвилини для випуску стисненого повітря, яке можливо залишилося в резервуарі 11 і закрити вентиль 15.
2. Запустити компресор у роботу, увімкнувши мережний вимикач 1 і натиснувши пускову кнопку 4.
3. Забезпечити підвищення надлишкового тиску повітря в резервуарі 11 до 60-80 кПа (0,6-0,8 кгс/см^2).
4. Поступовим відкриттям вентиля 15 установити витрату стисненого повітря, орієнтуючись на положення поплавця в межах 20-30 ділень шкали ротаметра.
5. Увімкнути вимірювач температури.
6. Після закінчення 20-25 хвилин роботи компресора визначити температуру стисненого повітря, використовуючи значення потенціометра (вимірювача температури) 17, виміряти спожитий електродвигуном струм, напругу в мережі і надлишковий тиск у резервуарі.
7. Після проведення досліду відключити електродвигун вимикачем 1 і відкрити вентиль 15 для випуску стисненого повітря в атмосферу.
8. З інтервалом 10-15 хвилин провести два досліди в послідовності до п.п. 2-7 при більшій продуктивності компресора, обумовленою витратою повітря в діапазоні 50-60 і 70-80 розподілів шкали ротаметра.

Обробка отриманих даних

1. Потужність, яка споживається електродвигуном компресора

$$N_e = U \cdot I \text{, Вт} \tag{4.9}$$

2. Тиск на виході з компресора визначається за формулою

$$p_2 = p_м + p_1 \tag{4.10}$$

де $p_м$ – показання манометра, кг/см^2;

p_1 – барометричний тиск, мм.рт.ст., який вимірюється лабораторним барометром.

3. Ступінь підвищення тиску

$$\beta = p_2 / p_1 \tag{4.11}$$

4. Теоретична робота компресора при адіабатному стисненні 1 кг повітря

$$L_k = \frac{kRT_1}{k-1}\left[(p_2/p_1)^{k-1/k} - 1\right], \tag{4.13}$$

де T_1 – температура повітря на вході в компресор, К (для повітря показник адіабати $k = 1{,}4$, газова стала $R = 286$ кДж/кг·К).

5. Продуктивність компресора визначається по формулі

$$G_к = 2{,}4 \cdot 10^5 \cdot H_{\text{р}}, \text{ кг/с}, \tag{4.13}$$

де $H_{\text{р}}$ – величина підйому поплавця ротаметра, ділень.

6. Теоретична потужність адіабатного компресора

$$N_k = G_k \cdot L_k, \text{ Вт} \tag{4.14}$$

7. Ефективний ККД компресора

$$\eta_{\text{е}} = \frac{N_k}{N_e \cdot \eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{ел.}}} \cdot 100, \% \ , \tag{4.15}$$

де $\eta_{\text{м}} = 0{,}82$ – механічний ККД компресора;

$\eta_{\text{ел.}} = 0{,}84$ – ККД електродвигуна компресора.

4.3. Контрольні запитання

1. За яким виразом визначається робота компресора при політропному процесі стиснення?
2. За яким виразом визначається робота компресора при ізотермічному процесі стиснення?
3. Основні процеси стиснення в теоретичній діаграмі компресора.
4. Пояснити цикл компресора в дійсній *p*-*V* діаграмі.
5. Які параметри характеризують ефективність роботи компресора?
6. В якому процесі стиснення витрачається мінімальна робота компресора?
7. Навести приклади практичного застосування компресорів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

5.1. Мета роботи

Поглиблення знань з теорії теплопровідності, вивчення методики експериментального визначення коефіцієнта теплопровідності ізоляційних матеріалів, дослідження ефективності теплової ізоляції.

У процесі підготовки і при проведенні лабораторної роботи студенту необхідно:

- ознайомитись з теоретичними положеннями, що є основою методу труби;
- ознайомитись з устаткуванням та принципом дії експериментальної установки;
- визначити значення коефіцієнта теплопровідності матеріалу, який досліджується;
- визначити ефективність застосування ізоляційних матеріалів для зниження теплових втрат при ізоляції труб.

5.2. Загальні відомості

Теплопровідність – це процес розповсюдження теплової енергії при безпосередньому контакті окремих частинок або окремих тіл при наявності різниці температур.

Основним законом теплопровідності є закон Фур'є.

$$Q = -\lambda \cdot F \cdot grad(t) = -\lambda \cdot F \cdot \frac{dt}{dx}, \text{ Вт} \qquad (5.1)$$

Відповідно до закону Фур'є, інтенсивність переносу теплоти у твердому тілі оцінюється величиною теплового потоку Q, визначається температурним градієнтом $grad(t)$ і значенням коефіцієнта теплопровідності даної речовини $\lambda\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}\right)$. Градієнт температури $grad(t)$ залежить від параметрів температурного поля в розглянутому тілі.

Коефіцієнт теплопровідності λ є теплофізичним параметром речовини, він характеризує здатність матеріалу проводити теплову енергію. Для різних матеріалів коефіцієнт теплопровідності залежить від структури, щільності, теплоємності, температури, тиску, маючи певні значення в даних умовах.

Значення коефіцієнта теплопровідності визначається дослідним шляхом на спеціальних лабораторних установках. Одним із методів визначення λ, які застосовуються в теплотехніці є метод труби або циліндра.

Для визначення теплопровідності матеріалу циліндричної стінки (рис.5.1) при постійному значенні коефіцієнта λ (у випадку сталого теплового стану системи, коли температура у всіх точках тіла не змінюється), можна використовувати рівняння Фур'є, яке має вигляд:

$$q_l = \frac{\pi \cdot \Delta t}{\frac{1}{2 \cdot \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт/м}, \qquad (5.2)$$

де $\Delta t = t_1 - t_2$ – різниця температур між внутрішньою і зовнішньою поверхнею труби, К;

$q_1 = Q/L$ – густина теплового потоку по довжині труби L, Вт/м.

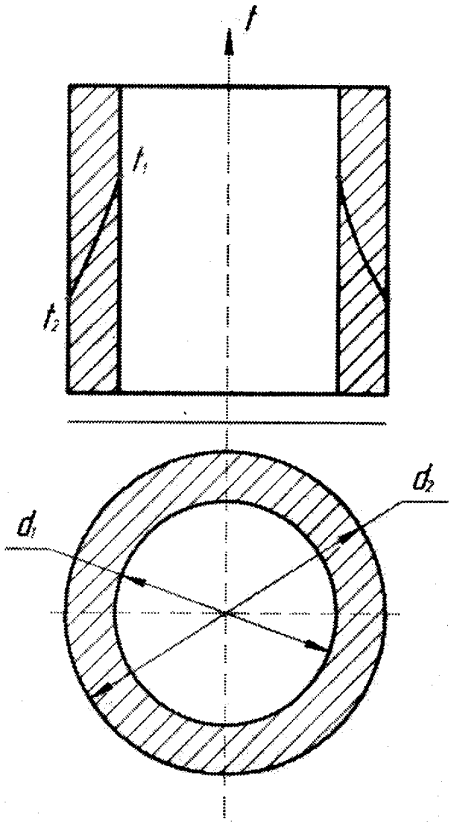
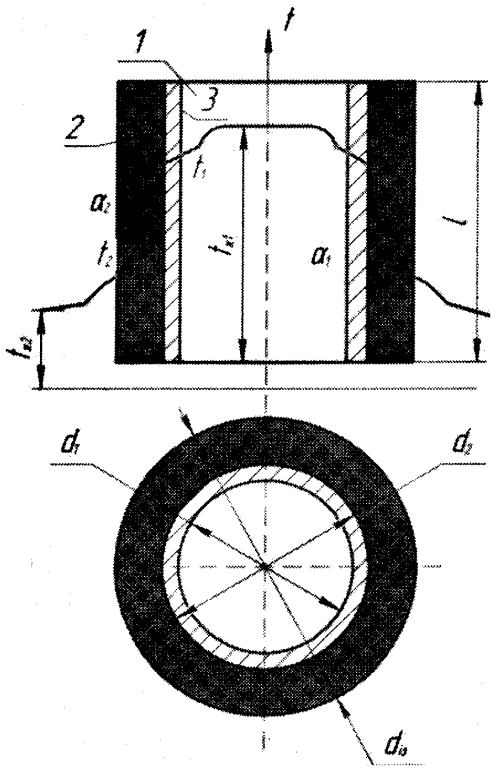


Рисунок 5.1 – Однорідна циліндрична стінка

У випадку багатошарової стінки, що складається із шарів різних матеріалів, рівняння теплопровідності має вигляд:

$$q_l = \frac{\pi \cdot (t_1 - t_2)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}, \text{ Вт/м} \qquad (5.3)$$

Будь-яке покриття гарячої поверхні, що сприяє зниженню втрат теплової енергії в навколишнє середовище, називається тепловою ізоляцією. Для теплової ізоляції можуть бути використані будь-які матеріали з низьким коефіцієнтом теплопровідності (пористі матеріали, азбест, пробка, скловата та ін.). Часто на практиці ізолюються трубопроводи, по яких рухаються гарячі середовища. На рис. 5.2 зображена найбільш проста схема одношарової ізоляції трубопроводу.



1 – гаряче середовище; 2 – стінка трубопроводу; 3 – теплова ізоляція

Рисунок 5.2 – Схема одношарової теплової ізоляції

У загальному випадку рівняння, що описує передачу теплоти через відрізок ізольованого трубопроводу довжиною L, має вигляд:

$$Q = \frac{\pi \cdot L \cdot \left(t_{c1} - t_{c2}\right)}{R_{із}} \tag{5.4}$$

$R_{із}$ називається термічним опором труби з ізоляцією. Величина $R_{із}$ складається з термічних опорів процесів теплопровідності ізоляції і тепловіддачі.

Без ізоляції:

$$R = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} \tag{5.5}$$

З ізоляцією:

$$R = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{із}} \cdot \ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_3} \tag{5.6}$$

У вирази (5.5) і (5.6) входять коефіцієнти теплопровідності матеріалу труби і ізоляції λ, $\lambda_{із}$, а також коефіцієнти тепловіддачі α_1 і α_2, що характеризують процеси передачі теплоти до стінки труби від гарячого середовища з температурою t_{c1} і від ізоляції до навколишнього середовища t_{c2}.

Критичний діаметр ізоляції розраховується за наступною формулою

$$d_{кр} = 2 \cdot \frac{\lambda_{із}}{\alpha_2} \tag{5.7}$$

Критичний діаметр $d_{кр}$ ізоляції не залежить від розмірів циліндричної труби. Він буде тим менше, чим менше коефіцієнт теплопровідності ізоляції $\lambda_{із}$, і тим більше коефіцієнт тепловіддачі α_2 від зовнішньої поверхні ізоляції до навколишнього середовища.

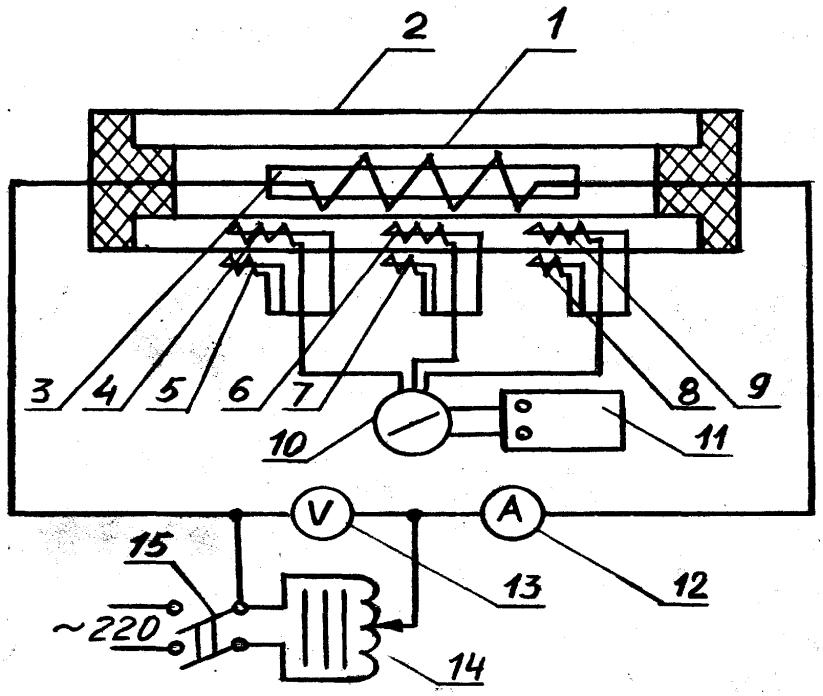
Для ефективної роботи ізоляції необхідно, щоб критичний діаметр був менше зовнішнього діаметра оголеної труби, тобто $d_{кр} \le d_2$.

Таким чином, для того, щоб ізоляція зменшувала теплові втрати циліндричної стінки в порівнянні з оголеною трубою при даному діаметрі труби d_2 і коефіцієнті тепловіддачі α_2 необхідно, щоб

$$\lambda_{із} \le \frac{\alpha_2 d_2}{2}. \qquad (5.8)$$

5.3. Лабораторна установка

Схема установки представлена на рис. 5.3. Установка складається з металевої (стальної) труби – 1 діаметром $d_{зв2}$ = 0,125м і довжиною L = 1,22м, покритої шаром досліджуваного ізоляційного матеріалу – 2, товщиною δ=0,015м, яким є азбест. Нагрівання труби здійснюється нагрівальним елементом – 3, при цьому для регулювання напруги застосовується лабораторний трансформатор (ЛАТР) – 14. Для визначення потужності, яка споживається нагрівальним елементом, у ланцюг живлення увімкнений вольтметр – 13.



1 – металева труба; 2 – шар ізоляції; 3 – нагрівальний елемент; 4,6,9 – термопари на внутрішній поверхні ізоляції; 5,7,8 – термопари на зовнішній поверхні ізоляції; 10 – перемикач термопар; 11 – логометр (вимірювач температури); 12 – амперметр; 13 – вольтметр; 14 – автотрансформатор (ЛАТР); 15 – (вмикач) вимикач мережі

Рисунок 5.3 – Схема експериментальної установки

Кількість теплоти, яка виділяється в навколишнє середовище через поверхню труби визначається за витратою електричної енергії. Для зниження теплових втрат торці труби закриті тепловою ізоляцією.

Температура матеріалу, що випробовується, виміряється шістьма хромель-капелевими термопарами. Три термопари 4,6,9 заміряють температуру на внутрішній поверхні ізоляції, а інші три термопари 5,7,8 – на зовнішній поверхні.

Приладом для вимірювання температури є логометр – 11. Для послідовного підключення термопар до вимірювача температур слугує перемикач – 10. Для визначення температури ізоляції використовується той самий вимірювач.

Вимірювання температури навколишнього повітря проводиться за допомогою ртутного лабораторного термометра.

Порядок проведення роботи

Увімкнути лабораторну установку в мережу вмикачем – 15 (рис.5.3) встановити тепловий режим (задати значення напруги, що регулюється за допомогою ЛАТРА – 14).

Всі вимірювання проводяться при строго сталому тепловому режимі. Фіксація сталого режиму відбувається при незмінній середній температурі зовнішньої t_2 і внутрішньої t_1 поверхні ізоляції. При цьому, вся теплова енергія, яка виділяється нагрівальним елементом у трубі, віддається в навколишнє середовище. Сталий тепловий стан наступає через 30-40 хвилин після включення установки.

Показання термопар визначають, послідовним підключенням їх до логометра – 11 перемикачем – 10, повторюючи виміри 2-3 рази через 5-10 хвилин. При цьому режим можна вважати сталим, якщо вимірювані температури поверхні ізоляції двох послідовних дослідів відрізняються не більше, ніж на 5 ^{0}C.

Параметри, які знімаються на установці заносять до протоколу.

Обробка експериментальних даних

1. Розраховується тепловий потік, який виділяється нагрівальним елементом

$$Q = U \cdot I \text{, Вт} \tag{5.9}$$

2. Визначається середня температура внутрішньої поверхні ізоляційного шару

$$\bar{t}_1 = \frac{t_4 + t_6 + t_9}{3} \text{, } ^0\text{C} \tag{5.10}$$

3. Визначається середня температура зовнішньої поверхні ізоляційного шару

$$\bar{t}_2 = \frac{t_5 + t_7 + t_8}{3}, {}^0\text{C} \qquad (5.11)$$

4. Розраховується коефіцієнт теплопровідності для ізоляційного матеріалу

$$\lambda_{із} = \frac{Q \cdot \ln \dfrac{d_3}{d_2}}{2 \cdot \pi \cdot L(\bar{t}_1 - \bar{t}_2)}, \text{Вт/м·К}, \qquad (5.12)$$

де $d_{зв2} = 0{,}125$м – зовнішній діаметр труби; $d_3 = 0{,}14$ м – діаметр труби з ізоляцією; $L = 1{,}22$ м – довжина труби.

5. Визначається коефіцієнт тепловіддачі від ізоляції в навколишнє середовище

$$\alpha_2 = \frac{Q}{\pi d_3 L(\bar{t}_2 - \bar{t}_0)}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}, \qquad (5.13)$$

де t_0 – температура повітря за показниками лабораторного термометра.

6. Критичний діаметр ізоляції розраховується за формулою (5.7).

7. Ефективність ізоляції розраховується за формулою (5.8).

5.4. Контрольні запитання

1. Що таке теплопровідність?
2. Як здійснюється передача теплової енергії у твердих тілах?
3. Чим визначається інтенсивність переносу теплової енергії у твердих тілах?
4. Поясність основний закон теплопровідності?
5. Дайте визначення коефіцієнта теплопровідності?
6. Від чого залежить величина коефіцієнта теплопровідності?
7. Що таке теплова ізоляція?
8. В яких випадках зазвичай застосовують теплову ізоляцію?
9. Що таке термічний опір?
10. Що таке критичний діаметр ізоляції?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

ТЕПЛОВІДДАЧА ЦИЛІНДРИЧНОЇ ТРУБИ ПРИ ПРИРОДНІЙ КОНВЕКЦІЇ

6.1. Мета роботи

Поглиблення знань з теорії конвективного теплообміну при вільному русі середовища, ознайомлення з методикою дослідження процесу тепловіддачі.

У процесі роботи необхідно ознайомитись з теоретичними основами методики експериментального дослідження процесу тепловіддачі, визначити значення коефіцієнта тепловіддачі при вільному русі повітря біля вертикально розташованої нагрітої труби, провести аналіз рівняння подібності, яке застосовується для опису процесу вільної конвекції, використовуючи дані експерименту.

6.2. Загальні відомості

Конвективним теплообміном або тепловіддачею називається процес переносу теплової енергії між поверхнею твердого тіла і середовищем (рідиною або газом), що контактує з ним. При цьому процес переносу теплової енергії, яка взаємодіє з твердим тілом, нерозривно пов'язаний з переміщенням середовища.

За природою виникнення розрізняють вільний і вимушений рух середовища. Вільним рухом теплоносія називається рух, що відбувається внаслідок різниці щільності нагрітих і холодних елементарних об'ємів рідини або газу в гравітаційному полі (у цьому випадку діє, так звана, піднімальна сила). Вимушеним називається рух середовища, що виникає під дією сторонніх сил (насоса, вентилятора і т.ін.).

Інтенсивність тепловіддачі при вільному русі залежить від різниці температур між тілом і середовищем, фізичних властивостей середовища і геометричних факторів (форми, розмірів, розташування тіла в просторі), від швидкості та природи виникнення руху середовища.

Кількість переданої теплоти (тепловий потік Q) при конвективному теплообміні визначається за законом Ньютона-Ріхмана

$$Q = \alpha\left(t_{\text{т}} - t_c\right) \cdot F\,, \tag{6.1}$$

де $t_{\text{т}}$, $t_{\text{с}}$ – температури стінки тіла і навколишнього середовища, К;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м^2 К;

F – поверхня теплообміну, м^2.

Коефіцієнт тепловіддачі характеризує інтенсивність теплообміну між тілом і навколишнім середовищем і являє собою кількість теплоти, яка передана від твердої стінки газу або рідині через одиницю площі за одиницю часу при різниці температур між стінкою і рідиною в 1К.

В експериментах середнє значення коефіцієнта тепловіддачі при вільному русі може бути визначене з рівняння (6.1)

$$\alpha = Q/F \cdot\left(t_{\text{т}} - t_c\right), \tag{6.2}$$

де $t_т$ – температура поверхні тіла, ^{0}C;

$t_с$ – температура середовища (у цьому випадку повітря), ^{0}C.

Процес тепловіддачі є складним процесом, а коефіцієнт тепловіддачі залежить від різних параметрів, що характеризують цей процес (у тому числі тіла, що включають форму і основні характерні розміри, температуру, швидкість руху середовища, фізичні властивості теплоносія і т.д.)

Застосовуючи методи теорії подібності до математичного опису процесу конвективного теплообміну при вільному русі повітря, можна одержати наступну залежність між безрозмірними числами подібності (критеріями подібності)

$$N_u = f\left(G_r \cdot P_r\right). \tag{6.3}$$

На підставі узагальнення експериментального матеріалу М. А. Міхєєвим отримане наступне чисельне рівняння подібності

$$N_u = C\left(G_r \cdot P_r\right)^n , \tag{6.4}$$

де N_u – число Нуссельта, що характеризує конвективний теплообмін між рідиною і поверхнею твердого тіла

$$N_u = \alpha L/\lambda , \tag{6.5}$$

G_r – число Грасгофа, що характеризує співвідношення піднімальної сили, яка виникає внаслідок різниці густини рідини і сили молекулярного тертя

$$G_r = gL^3\beta\Delta t/\nu^2 , \tag{6.6}$$

P_r – число Прандтля, що характеризує фізичні властивості середовища (повітря)

$$P_r = \nu/a . \tag{6.7}$$

До виразів чисел подібності входять параметри:

β – коефіцієнт об’ємного розширення, 1/К:

$$\beta = 1/\left(t_с + 273\right), \tag{6.8}$$

ν – коефіцієнт кінематичної в’язкості, м^2/с;

a – коефіцієнт температуропровідності $a = \lambda/c_p \cdot \rho$, м^2/с;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;

$c_р$ – питома теплоємність, Дж/кг·К;

ρ – густина, кг/м^3;

L – характерний розмір труби, яка досліджується, м;

Δt – різниця між середньою температурою поверхні розрахункової ділянки і температурою навколишнього середовища, К;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м^2·К;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2;

C і n – чисельні коефіцієнти рівняння подібності.

У реальних умовах теплообміну коефіцієнти C і n залежать від режиму руху середовища, що перебуває в зіткненні з нагрітою поверхнею тіла.

Табл. 6.1 може бути використана для порівняння отриманих у досліді результатів з відомими даними і визначення режиму руху повітря.

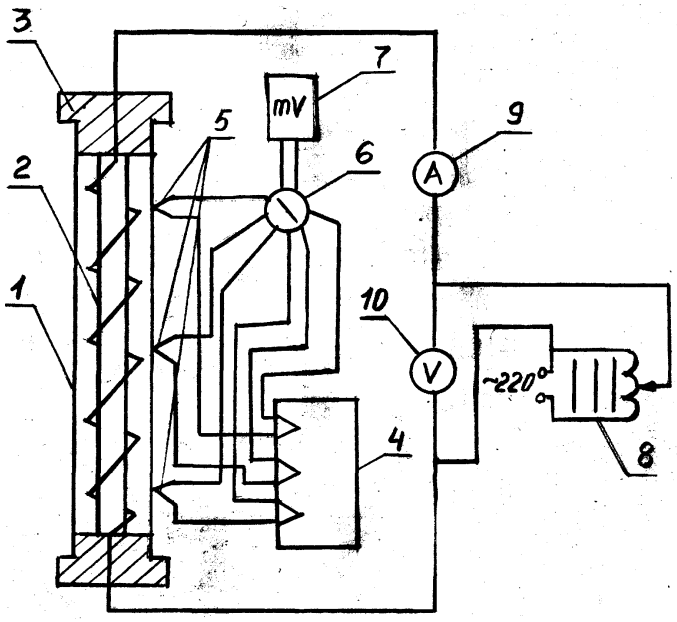
Таблиця 6.1 – Значення сталих C і n

Режим руху повітря	$G_r \cdot P_r$	C	n
Ламінарний	$5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^9$	0,5	0,25
Турбулентний	$5 \cdot 10^9 - 5 \cdot 10^{10}$	0,15	0,33

Рівняння (6.4) справедливо для подібних явищ теплообміну лише в інтервалі експериментально отриманих значень добутку $G_r \cdot P_r$. Значення коефіцієнта пропорційності C і показника ступеня n визначаються на підставі обробки експериментальних даних і побічно характеризують режим обтікання рідиною (газами) нагрітого тіла при вільній конвекції. Користуючись рівнянням (6.4) при конкретних числових значеннях C і n, знаючи основні параметри стінки і навколишнього середовища, можна визначити коефіцієнт тепловіддачі від стінки до рідини (газу) або навпаки – від рідини (газу) до стінки.

6.3. Лабораторна установка

Сутність експериментального методу, який використовується в лабораторній роботі, полягає у визначенні кількості теплоти, що віддається досліджуваною трубою в навколишнє середовище, і знаходженні температур труби і середовища при сталому тепловому режимі. Схема експериментальної установки наведена на рис. 6.1.



1 – вертикальна труба; 2 – нагрівальний елемент; 3 – диски; 4 – холодні спаї термопар (виведені в коробку); 5 – термопари; 6 – перемикач термопар; 7 – потенціометр; 8 – ЛАТР; 9 – амперметр; 10 – вольтметр

Рисунок 6.1 – Схема експериментальної установки

Усередині експериментальної труби 1 розташований нагрівальний елемент 2. Торці досліджуваної труби захищені дисками 3, виготовленими з теплоізоляційного матеріалу.

Діаметр труби $d_з$ = 0,065 м, довжина труби L = 0,620 м. Нагрівальний елемент живиться через лабораторний автотрансформатор (ЛАТР) 8 від мережі змінного струму напругою 220В. Визначення потужності, споживаної нагрівальним елементом, відбувається за показником амперметра 9 і вольтметра 10. Кількість виділеної і переданої в навколишнє середовище теплоти визначається по споживаній електричній потужності.

Для вимірювання температури поверхні, що віддає теплоту, в стінці труби закладені рівновіддалені одна від одної термопари 5. Номери термопар на схемі відповідають номерам крапок на перемикачі 6. На схемі спаї термопар умовно показані вздовж однієї утворюючої труби. В дійсності, для обліку зміни температури по поверхні труби, термопари розташовані відносно одна від одної під кутом 60^0.

В експериментальній установці використані хромель-копелеві термопари, гарячі спаї яких закарбовані на поверхні труби. ЕРС термопар вимірюється потенціометром (вимірювачем температури) 7. Всі холодні спаї термопар розташовані в коробці 4, де знаходиться масло при постійній температурі $t_{хс}$.

За допомогою термопар вимірюється різниця температур між гарячим і холодним спаєм

$$t_{п,mv} = t_{гс} - t_{хс}, \qquad (6.9)$$

де $t_{гс}$ – температура гарячого спаю термопари (температура стінки труби), ^{0}C;

$t_{хс}$ – температура холодного спаю термопари, ^{0}C;

$t_п$ – показання потенціометра, переведені в ^{0}C.

Температура навколишнього повітря t_c вимірюється на відстані від досліджуваної труби ртутним термометром.

Порядок проведення роботи

Після ознайомлення з описом експериментальної установки необхідно заготовити форму протоколу для запису спостережень і розпочати виконання роботи.

Всі вимірювання на стенді виконуються при строго сталому тепловому режимі. Настання сталого теплового режиму визначається по незмінній температурі поверхні труби і характеризується тим, що тепловий потік, який виділяється з поверхні досліджуваної труби, залишається постійним. Час настання сталого теплового режиму становить близько 30-40 хвилин.

Після увімкнення установки в мережу, ЛАТРом -8 піднімається напруга до необхідного режиму роботи установки $U = 120 \div 220$В.

Будь-який тепловий режим може бути підготовлений попереднім увімкненням установки за 30-40 хвилин до початку проведення лабораторної роботи.

Дані вимірювань кожного проведеного досліду записуються, у тому числі, напруга U, сила струму I, показання потенціометра (вимірювача температури), який підключається послідовно до трьох термопар, а також температуру повітря t_c і час початку проведення досліду.

Обробка експериментальних даних

Для кожного сталого теплового режиму необхідно:

1. Розрахувати кількість теплоти, виділеної на розрахунковій ділянці досліджуваної труби

$$Q = W = I \cdot U, \text{ Вт}, \tag{6.10}$$

де I – струм, А;

U – величина напруги, В.

Виділена теплота віддається навколишньому середовищу конвективним теплообміном і випромінюванням

$$Q = Q_к + Q_п, \text{ Вт}, \tag{6.11}$$

де $Q_к$ – теплота, яка передана навколишньому середовищу шляхом конвективного теплообміну, Вт;

$Q_п$ – теплота, яка передана навколишньому середовищу шляхом випромінювання, Вт.

2. Розрахувати середню температуру поверхні труби

$$\bar{t}_т = \sum_{i=1}^{3} t_{тi} \Big/ 3, \ ^0\text{C}, \tag{6.12}$$

де $t_{тi}$ – показання термопар за потенціометром.

3. Розрахувати променевий тепловий потік

$$Q_п = C_{пр}\left(\frac{T_т}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_с}{100}\right)^4 \cdot F, \text{ Вт}, \tag{6.13}$$

де $T_т$, К – абсолютна температура стінки труби; приймається як середня арифметична з показань трьох термопар при сталому режимі;

$T_с$, К – абсолютна температура рухомого середовища;

$C_{пр} = 2{,}09$ Вт/м^2·К^4 – приведений коефіцієнт випромінювання;

$F = \pi dL$, м^2 – поверхня досліджуваної труби.

4. Розрахувати кількість теплоти, яка передана повітрю шляхом конвективного теплообміну

$$Q_к = Q - Q_л, \text{ Вт}. \tag{6.14}$$

5. Розрахувати густину теплового потоку

$$q_к = Q_к / F, \text{ Вт/м}^2. \tag{6.15}$$

6. Визначити коефіцієнт тепловіддачі конвекцією

$$\alpha_к = Q_к / \pi d_н L \Delta t \text{, Вт/м}^2 \cdot \text{К} \qquad (6.16)$$

З рівняння (6.16) видно, якщо розрахувати тепловий потік, та виміряти температуру поверхні тіла і навколишнього середовища, то можна експериментально визначити коефіцієнт тепловіддачі конвекцією $\alpha_к$. Для поширення отриманих результатів на інші подібні процеси необхідно досліджені дані порівняти зі значеннями, одержаними із узагальненого рівняння подібності (6.4).

7. Розрахувати числа подібності:

Нуссельта

$$N_u = \alpha d_п / \lambda, \qquad (6.17)$$

Грасгофа

$$G_r = g \cdot \beta \cdot d_п^3 \frac{(t_т - t_с)}{\nu^2}, \qquad (6.18)$$

Прандтля

$$P_r = \nu / a. \qquad (6.19)$$

Фізичні параметри повітря (ν, a, λ) беруться з таблиці (додаток 4 і 7) при середній температурі повітря.

$$t_{ср} = 0{,}5(t_т + t_с) \qquad (6.20)$$

8. Коефіцієнт β розраховується за виразом

$$\beta = \frac{1}{t_{ср} + 273{,}15}, \qquad (6.21)$$

9. Відповідно до отриманого значення добутку G_r, P_r вибрати значення показників $(C^* \text{і } n^*)$, що входять до рівняння подібності по табл. 6.1 і розрахувати величину критерію Нуссельта за формулою

$$N_u^* = C^* \cdot (G_r \cdot P_r)^{n^*} \qquad (6.22)$$

10. Розрахувати коефіцієнт тепловіддачі за критерієм Нуссельта

$$\alpha = \frac{N_u \cdot \lambda}{d}, \qquad (6.23)$$

6.4. Контрольні запитання

1. Що експериментально визначається в роботі?
2. Що називається сталим режимом?
3. Фізична сутність передачі теплоти конвекцією, випромінюванням і теплопровідністю.
4. Що називається конвективним теплообміном?
5. В яких середовищах і чому може спостерігатись конвективний теплообмін?
6. Що називається тепловіддачею?
7. Записати закон Ньютона-Ріхмана.
8. Що характеризує і який фізичний зміст коефіцієнта тепловіддачі?
9. Від яких факторів залежить коефіцієнт тепловіддачі?
10. Який конвективний теплообмін називається вільним?
11. Який конвективний теплообмін називається вимушеним?
12. Який фізичний зміст чисел Нуссельта, Грасгофа і Прандтля?
13. Що називається рівнянням подібності?
14. В якому діапазоні параметрів справедливо отримане рівняння подібності?
15. Як користуватися рівнянням подібності?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

ВИДИ ТА РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ

7.1. Мета роботи

Закріплення знань з теорії теплопередачі та вивчення принципів роботи теплообмінних апаратів, оволодіння методикою розрахунку теплообмінників.

7.2. Загальні відомості

Системи гарячого водопостачання приєднують до теплових мереж за допомогою теплообмінних апаратів. В системах гарячого водопостачання застосовують ємкісні та рекуперативні апарати. Рух середовищ у теплообмінному апараті може здійснюватись за прямоточною або протиточною схемою які наведені на рис.7.1 і рис. 7.2.

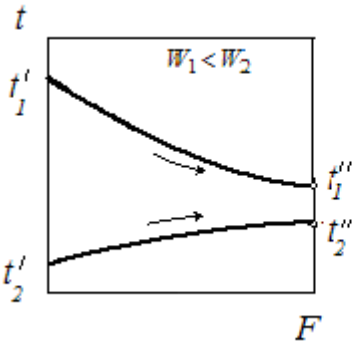


Рисунок.7.1 – Зміна температури теплоносіїв при прямотоці

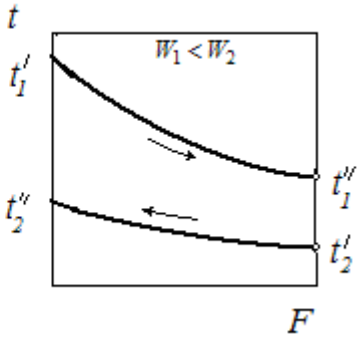


Рисунок. 7.2 – Зміна температури теплоносіїв при протитоці

При теплових розрахунках теплообмінників використовують рівняння теплового балансу для гріючого середовища (7.1), для речовини, що нагрівається (7.2), і рівняння теплопередачі (7.3). При конструктивному розрахунку з рівняння (7.3) визначають необхідну площу поверхні теплообміну з подальшим розрахунком геометричних характеристик апарата (кількість секцій, кількість пластин тощо).

$$Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_1' - t_1''), \tag{7.1}$$

$$Q = G_2 \cdot c_2 \cdot (t_2' - t_2''), \tag{7.2}$$

$$Q = k \cdot F \cdot \overline{\Delta t}, \tag{7.3}$$

де Q – кількість теплоти, якою в апараті обмінюються середовища, кДж;

G_1, G_2 –витрати середовищ, кг/с; c_1, c_2 – питома теплоємкість середовищ, кДж/кг·К;

t_1', t_1'' – температура гріючого середовища на вході в апарат і на виході з апарату, ^{0}С;

t_2', t_2'' – температура речовини, що нагрівається на вході в апарат і на виході з апарату, ^{0}С;

k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м^2·К;

F – площа поверхні теплообміну, м^2;

$\overline{\Delta t}$ – середньологарифмічна різниця температур в апараті, ^{0}С.

Для визначення середньологарифмічного температурного напору користуються формулою

$$\Delta t_{\text{с}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \dfrac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}\ , \tag{7.4}$$

де $\Delta t_{\text{б}}$, $\Delta t_{\text{м}}$ – більший і менший перепади температур між теплоносіями на кінцях теплообмінника.

В прямоточному теплообміному апараті $\Delta t_{\text{б}}$ завжди дорівнює різниці температур теплоносіїв на вході, а $\Delta t_{\text{м}}$ – на виході.

В протитоковому теплообміннику теплоносії рухаються назустріч один одному і значення Δt на кінцях визначаються за різницею температур на вході гарячого і на виході холодного теплоносія.

Величини Δt і k в рівнянні теплопередачі (7.3) можна вважати сталими тільки для елемента поверхні dF. Тому рівняння теплопередачі для елемента dF справедливе лише в диференціальній формі $dQ = kdF\Delta t$.

Тепловий потік, який передається через всю поверхню розраховується за наступною формулою

$$Q = \int_0^F k dF \Delta t = kF\Delta t \tag{7.5}$$

Площа поверхні теплообміну визначається за формулою

$$F = \frac{Q}{k\Delta t}, \tag{7.6}$$

де Q – тепловий потік, який визначають із рівняння теплового балансу.

При відомій площі однієї секції ($f_{\text{о}}$) секційних апаратів кількість секцій визначають за формулою

$$N = F/f_{\text{о}} \tag{7.7}$$

7.3. Контрольні завдання

Завдання 7.1.

Визначити площу нагріву та кількість секцій водоводяного теплообмінника типу «труба в трубі». Гаряча вода рухається через внутрішню сталеву трубу, її температура на вході дорівнює t_1', а витрати – G_1. Вода, що нагрівається, рухається за протитечійною схемою в зазорі між трубами і нагрівається від t_2' до t_2'', її витрати становлять G_2. Коефіцієнт теплопередачі прийняти рівним 700 Вт/(м^2·К). Вихідні дані прийняті за табл. 7.1, 7.2. Площу поверхні однієї секції вважати 2 м^2.

Таблиця 7.1 – Температура середовища за варіантами

Температура, ^{0}С	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Гріючої води на вході в апарат, t_1'	42	42	42	77	77	77	77	120	130	150
Води, що нагрівається: - на вході, t_2'; - на виході, t_2''	2 25	3 30	4 35	5 55	10 60	15 25	20 30	25 60	30 60	35 60

Таблиця 7.2 – Витрати середовища за варіантами

Витрати води, кг/с	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Гріючої води G_1	10	10	10	25	25	45	45	20	50	50
Води, що нагрівається G_2	10	5	5	10	20	25	30	5	15	25

Завдання 7.2.

Для умов попереднього завдання визначити площу теплообмінника за прямоточною схемою руху середовищ. Порівняти результати розрахунків.

Завдання 7.3.

Розрахувати величину коефіцієнта теплопередачі через стінку теплообмінного апарата, виготовленого з нержавіючої сталі, коефіцієнт теплопровідності якої становить $\lambda_{ст}$. Товщина стінки дорівнює δ (табл. 7.3), коефіцієнт тепловіддачі по гріючому та «холодному» середовищу становить відповідно α_1 та α_2 (табл. 7.4).

Таблиця 7.3 – Параметри стінки апарата

Величина	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Товщина стінки δ, мм	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2
Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{ст}$, Вт/(м·К)	16	20	16	19	17	20	17	20	16	21

Таблиця 7.4 – Коефіцієнти тепловіддачі за варіантами

Коефіцієнти тепловіддачі Вт/(м$^2 \cdot$К)	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Збоку гріючого середовища α_1	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000
Збоку «холодного» середовища α_2	4000	5000	6000	5000	5000	5000	15000	15000	15000	15000

7.4. Контрольні запитання

1. Яке призначення теплообмінних апаратів?
2. За якими ознаками класифікують теплообмінні апарати?
3. Як записати рівняння теплопередачі?
4. Яка мета теплового розрахунку теплообміних апаратів?
5. Де використовуються теплообмінні апарати?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

ВИПРОБУВАННЯ АВТОНОМНОГО КОНДИЦІОНЕРА

8.1. Мета роботи

Визначити зміну параметрів повітря, обробленого в кондиціонері; розрахувати продуктивність кондиціонера по повітрю; знайти холодовидатність кондиціонера і масу вологи, яка випадає з повітря за одиницю часу.

8.2. Загальні відомості

Кондиціонер – автоматично діюча установка, яка призначена для створення і підтримання в приміщенні мікроклімату певних параметрів (кондицій). Оптимальні значення параметрів повітряного середовища встановлюються санітарно-гігієнічними нормами в залежності від призначення виробничих приміщень, категорії робіт і періоду року (літній або зимовий).

Системи кондиціювання повітря диференціюють на центральні, місцеві і автономні.

В центральних системах повітря, оброблене в одній спільній установці, яка включає холодильні машини і кондиціонери, подається розподільними повітропроводами в різні приміщення будівлі. В місцевих системах відбувається централізоване виробництво холоду і централізована обробка повітря в місцевих кондиціонерах, встановлених в окремих приміщеннях. В автономних системах кондиціонери мають свої джерела теплоти і холоду, які є їх конструктивними елементами. Для обслуговування кожного приміщення використовується свій автономний кондиціонер. Обробка повітря в кондиціонері перед його подачею в приміщення передбачає основні процеси: підігрівання або охолодження, зволоження або сушіння, а також очищення від пилу. Для більшості кліматичних районів нашої країни в зимовий час треба підігрівати і зволожувати приточне повітря, а в літній – охолоджувати й осушувати.

За схемою обробки повітря системи кондиціювання поділяються на прямоточні, які характеризуються обробкою лише зовнішнього повітря, і рециркуляційні, які характеризуються обробкою в кондиціонерах суміші зовнішнього рециркуляційного повітря. Найбільш економічні системи другого типу, оскільки в них у зимовий період менше витрачається теплоти на підігрівання зовнішнього повітря, а в літній – заощаджується витрата холоду на його охолодження.

Процеси змішування й охолодження повітря, яке обробляється в кондиціонері, з рециркуляцією для літнього періоду в *h-d*–діаграмі (додаток 12), зображені на рис. 8.1.

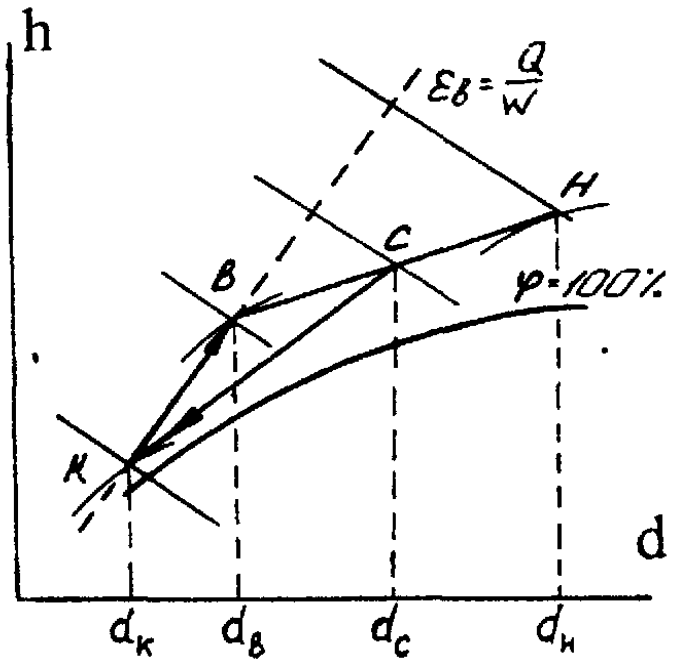


Рисунок 8.1 – Схематичне зображення процесу кондиціювання повітря у літній період в *hd*-діаграмі

Суміш зовнішнього і внутрішнього (рециркуляційного) потоків повітря, яке надходить на обробку в кондиціонер, на *hd*-діаграмі зображується точкою *C*, що знаходиться на прямій, яка сполучає точки *H* і *B*, відповідні початковим становищам зовнішнього і внутрішнього повітря.

Точка *C* знаходиться на відстані від точок *H* і *B*, обернено пропорційній змішуваним масам зовнішнього G_H і внутрішнього G_B повітря.

$$\frac{BC}{(HC)} = \frac{G_{\text{н}}}{G_{\text{в}}} = \frac{(d_c - d_a)}{(d_{\text{н}} - d_C)}. \tag{5.1}$$

Повітря в кількості $G = G_{\text{н}} + G_{\text{в}}$, яке оброблене в кондиціонері до кінцевого стану K (процес обробки умовно показано лінією *CK*), надходить у кондиційоване приміщення, нагрівається і зволожується в ньому (процес *KB*).

Надлишок повітря у кількості $G_{\text{н}}$ вилучається з приміщення через нещільності або за допомогою витяжної вентиляції і процес кондиціювання повторюється.

Необхідний тепловий і вологовмісний баланс приміщення забезпечується кондиціонером при виконанні таких умов:

$$Q = G(h_{\text{п}} - h_{\text{к}}), \tag{8.2}$$

$$W = G(d_{\text{п}} - d_{\text{к}}), \tag{8.3}$$

де Q – тепловий потік, який вилучається з приміщення, кВт;

$h_{\text{п}}, h_{\text{к}}$ – ентальпія повітря відповідно у приміщенні до і після кондиціонера, кДж/кг;

W – маса вологи, що вилучається з приміщення, кг/с;

$d_{\text{п}}, d_{\text{к}}$ – вологовміст повітря, відповідно в середині приміщення і після кондиціонера, кг/кг.

Поділивши Q на W, одержимо

$$\varepsilon_{\text{п}} = Q/W = (h_{\text{п}} - h_{\text{к}})/(d_{\text{п}} - d_{\text{к}}), \qquad (8.4)$$

де $\varepsilon_{\text{п}}$ – тепловологісне відношення, або кутовий коефіцієнт променя процесу зміни стану повітря у кондиційованому приміщенні, кДж/кг.

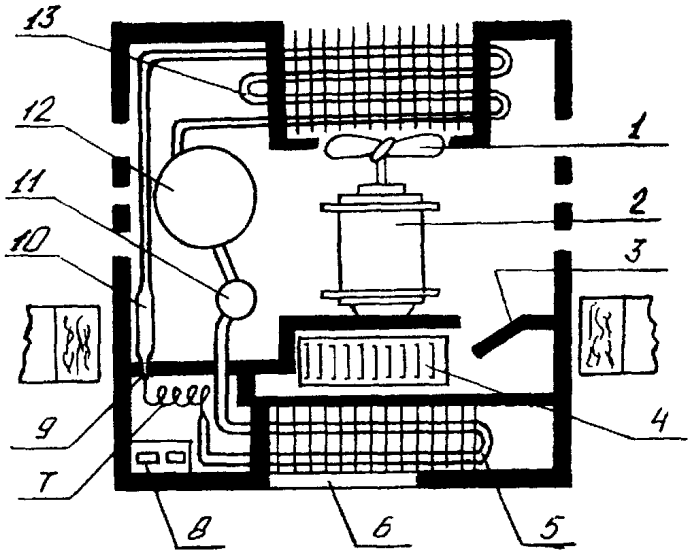
Параметри повітря $h_{\text{п}}$ і $d_{\text{п}}$ у кондиційованому приміщенні повинні бути завжди сталими, незважаючи на те, що в умовах експлуатації значення тепловиділення Q і вологовиділення W змінні. Оскільки кількість повітря G, яка подається в приміщення, звичайно стала, для задоволення рівнянь (8.2) і (8.3) тепловологісного балансу параметри кондиційованого повітря $h_{\text{к}}$ і $d_{\text{к}}$ повинні мати можливість змінюватись у певних межах. Для того, щоб одночасно поглинути надлишок теплоти і вологи (в літній час), точка *K*, яка характеризує кондиційоване повітря, повинна завжди залишатись на лінії постійного тепловологісного відношення, що проходить під кутом, визначеним значенням $\varepsilon_{\text{к}}$.

Лабораторна установка

Об’єктом випробувань є автономний кондиціонер БК-2500, який забезпечує: охолодження повітря, сушіння повітря від надлишкової вологості.

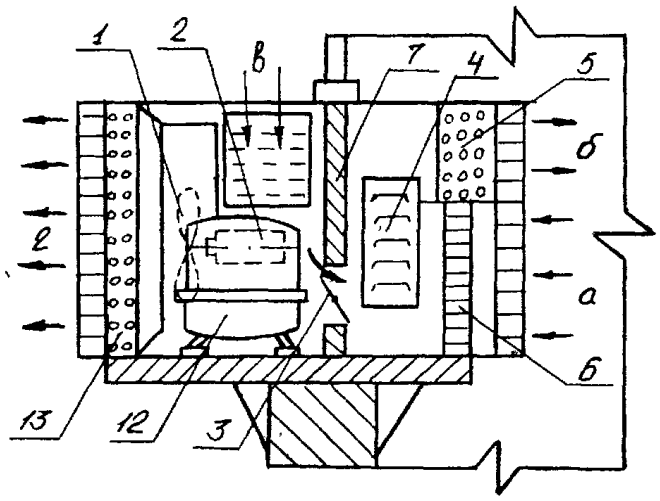
Всі вузли кондиціонера змонтовані на металевій рамі. На рис. 8.2 зображена принципова схема кондиціонера. Металевою перегородкою з теплозвуковою ізоляцією корпус поділений на два герметичні відсіки: зовнішній і внутрішній. У перегородці передбачено отвір, що перекривається заслінкою, за допомогою якої регулюють приток зовнішнього повітря (до 15 %) в примущенні.

У зовнішньому відсіку, розташованому за вікном, розміщені: герметичний компресор, який працює на фреоні, конденсатор, який обдувається повітрям за допомогою осьового вентилятора, електродвигун. У внутрішньому відсіку розташовані випарник холодильної машини, повітряний фільтр і відцентровий вентилятор, який нагнітає повітря у приміщення. Зовнішній відсік сполучається з атмосферним повітрям, а внутрішній – з повітрям кондиційованого приміщення. Схема руху повітряних потоків покзана на рис. 8.3.



1 – вентилятор осьовий; 2 – електродвигун вентиляторів; 3 – заслінка;
4 – вентилятор відцентровий; 5 – випарник; 6 – фільтр повітряний; 7 – перегородка;
8 – пульт управління; 9 – капілярна трубка; 10 – фільтр-осушувач;
11 – розширювач; 12 – компресор ротаційний; 13 – конденсатор

Рисунок 8.2 – Принципова схема побутового кондиціонера



а – вхід рециркуляційного повітря приміщення;
б – вихід охолодженого повітря в приміщення;
в – вхід зовнішнього повітря; *г* – вихід нагрітого повітря назовні

Рисунок 8.3 – Схема руху повітряних потоків у кондиціонері

Робота кондиціонера здійснюється таким чином. Зовнішнє повітря, яке всмоктується вентилятором 1 через жалюзі *в*, подається на охолодження конденсатора 13 і через жалюзі 2 виходить назовні. Повітря, яке надходить з приміщення, очищується у фільтрі 6 і вентилятором 4 подається у випарник 5 холодильної машини. Охолоджене у випарнику повітря надходить до приміщення.

Холодильний агрегат використовується для охолодження повітря і складається з ротаційного компресора, конденсатора, випарника, осушувача, розширювача і системи трубопроводів, які утворюють герметично замкнену систему.

Привід вентиляторів здійснюється від спільного електродвигуна. При випробуванні кондиціонера, необхідно вимірювати температуру і відносну вологість повітря. Ці параметри визначаються за допомогою аспіраційних психрометрів, розміщених на гачках біля захисних решіток зовнішнього (*в*), рециркуляційного (*d*) і випускного (*б*) вікон кондиціонера з таким розрахунком, щоб вхідні отвори захисних трубок термометрів знаходились в центрі вікон. Швидкість повітря у випускному вікні (*б*) вимірюється анемометром.

Порядок проведення роботи

1. Ознайомитись з обладнанням кондиціонера на місці. На передній стінці кондиціонера є панель управління, на якій розташовані ручки перемикача режимів роботи, регулятора температури і управління положенням заслонки.

2. Підготувати кондиціонер до пуску. Перевірити наявність фільтра, і якщо необхідно, очистити його від пилу. Потім поставити перемикач в положення «Викл.» і вставити вилку в розетку.

3. Включити кондиціонер в роботу поворотом ручки перемикача в одне з чотирьох положень відповідно з бажаним режимом. У режимі «Конд.» (кондиціювання) знижується температура в приміщенні, вентилюється і очищається повітря від пилу, а також зменшується його вологість.

У режимі «Вентил.» (вентиляції) здійснюється циркуляція повітря в приміщенні без зниження температури й очистка його від пилу.

Бажану температуру повітря в режимі «Конд.» треба задати поворотом ручки регулятора температури з положення «1» до «3» (слабе охолодження), в положення «6» (нормальне охолодження) або в положення «9» (сильне охолодження).

Після пуску кондиціонера ручку заслонки перевести в положення «Откр.» (відкрито). При бажанні кондиціонер може працювати з закритою заслонкою. Для цього ручку необхідно перевести в положення «Закр.» (закрито).

4. Після виходу кондиціонера на усталений режим провести всі необхідні вимірювання 3-5 разів:

а) середню швидкість потоку повітря у вихідному вікні кондиціонера визначають анемометром, рівномірно і послідовно переміщуючи його по всій площі решітки вікна;

б) показання сухого і мокрого термометрів по психрометрам, розташованим у зовнішнього, рециркуляційного і випускного вікон кондиціонера, знімають одночасно.

5. Після закінчення випробувань вимкнути кондиціонер, для чого поставити перемикач режимів роботи в положення «Викл.» (вимкнуто) і відключити від мережі.

6. Результати випробувань і наступні обчислення занести до протоколу випробувань.

7. Виміряти площу F, м^2 випускного вікна кондиціонера.

Протокол випробувань

Параметр			№ вимір.			Середнє значення
			1	2	3	
Повітря	Зовнішнє	Температура термометра сухого $t_с$, ^{0}C мокрого $t_м$, ^{0}C				
	Внутрішнє (рециркуляційне)	Температура термометра сухого $t_с$, ^{0}C мокрого $t_м$, ^{0}C				
	Кондиційоване	Температура термометра сухого $t_с$, ^{0}C мокрого $t_м$, ^{0}C				
	Швидкість повітря	υ, м/с				

Обробка результатів вимірювань

За середніми арифметичними значеннями температур зовнішнього, внутрішнього і кондиційованого повітря за номограмою (рис. 8.4) визначити відносну вологість і на hd-діаграмі (додаток 12) знайти положення точок *H*, *B*, *K*, а використовуючи формулу (8.1) і точку *C*, яка характеризує змішане повітря перед обробкою в кондиціонері. За допомогою hd-діаграми (додаток 12) визначити ентальпії і вологовміст характерних точок.

Протокол розрахунків

Величина	Позначення	Одиниця виміру	Формула для обчислення	Значення в точках				
				5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Відносна вологість	φ	%	Рис. 8.4					
Ентальпія повітря	*h*	кДж/кг	Дод. 7					
Вологовміст	*d*	кг.п/кг сух.пов	$m_{в.п}/m_{с.п} = 0{,}62p_п/p_{ат}-p_п$					
Продуктивність кондиціонера по повітрю	*G*	кг/с	$υ_{ср}\ ρF$					
Витрата рециркуляційного повітря	$G_в$	кг/с	$G - G_в$					
Витрата зовнішнього повітря	$G_н$	кг/с	$0{,}15\ G$					

Продовження протоколу розрахунків

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Холодовидатність кондиціонера	Q	кВт	$G_{сух}(h_с-h_к)$					
Видатність кондиціонера по сухому повітрю	$G_{сух}$	кг сух.пов./с	$G/(1+0{,}001d_в)$					
Маса вологи, яка випадає з повітря	W	кг/с	$G_{сух}/(d - d)$					

8.3. Контрольні питання

1. У чому сутьність кондиціювання повітря?
2. Які існують системи кондиціювання?
3. Як визначити стан після змішування зовнішнього і рециркуляційного потоків поівтря?
4. Як зображується в *hd*-діаграмі процес кондиціювання з рециркуляцією повітря приміщення?
5. При яких умовах кондиціонер забезпечує тепловий і вологий баланс приміщення?
6. З яких елементів складається автономний кондиціонер і як він працює?

Задачі до самостійної роботи

«Теплоємність ідеального газу»

1. Питома молярна теплоємність ідеального газу в ізобарному процесі дорівнює 29,3 кДж/(кмольК). Газова стала ідеального газу 287Дж/(кгК). Знайти: молярну масу газу, питому масову теплоємність газу в ізохорному процесі, питому об'ємну теплоємність газу в ізобарному процесі.
2. Питома молярна теплоємність ідеального газу в ізобарному процесі дорівнює 33,44 кДж/(кмольК). Газова стала ідеального газу 589 Дж/(кгК). Знайти: молярну масу газу, питому об'ємну теплоємність газу в ізохорному процесі, питому масову теплоємність газу в ізобарному процесі.
3. Питома молярна теплоємність ідеального газу в ізохорному процесі дорівнює 25,14 кДж/(кмольК). Газова стала ідеального газу 130 Дж/(кгК). Знайти: молярну масу газу, питому масову теплоємність газу в ізохорному процесі, питому об'ємну теплоємність газу в ізобарному процесі.
4. Питома молярна теплоємність ідеального газу в ізохорному процесі дорівнює 20,93 кДж/(кмольК). Газова стала ідеального газу 260 Дж/(кгК). Знайти: молярну масу газу, питому об'ємну теплоємність газу в ізохорному процесі, питому масову теплоємність газу в ізобарному процесі.
5. Газова стала ідеального газу дорівнює 278 Дж/(кгК), а показник адіабати 1,36. Знайти: молярну масу газу, питому масову та питому об'ємну теплоємності газу в ізобарному процесі.
6. Газова стала ідеального газу дорівнює 260 Дж/(кгК), а показник адіабати 1,32. Знайти: молярну масу газу, питому масову та питому об'ємну теплоємності газу в ізохорному процесі.
7. Питома об'ємна теплоємність ідеального газу в ізобарному процесі становить 1260 Дж/($м^3$К), а його молярна маса дорівнює 31,2 кг/кмоль. Знайти: газову сталу, питому молярну та питому масову теплоємності газу в ізохорному процесі.
8. Питома об'ємна теплоємність ідеального газу в ізобарному процесі становить 1003 Дж/($м^3$К), а його молярна маса дорівнює 26 кг/кмоль. Знайти: газову сталу, питому молярну та питому масову теплоємності газу в ізохорному процесі.
9. Для нагрівання 10 кмолів аміаку (NH_3) на 10 ^{0}С потрібно 2930 кДж теплоти. Скільки теплоти потрібно для нагрівання 1 кг цього газу на 7 ^{0}С?
10. Знайти питому масову та питому об'ємну теплоємність водню в ізобарному процесі при температурі 50 ^{0}С.

«Термодинамічні процеси ідеального газу»
«Ізохорний процес»

1. У закритій посудині V = 1 м^3 знаходиться водень при тиску p_1 = 0,1МПа, t_1 = - 3^{0}С. Визначити зміну внутрішньої енергії, якщо тиск змінився до 0,2 МПа.
2. У закритому балоні ємністю 50 л знаходиться повітря при p_1 = 1 МПа та температурі t_1 = 27 ^{0}С. Після охолодження відбувається віддача теплоти, яка дорівнює 20 кДж. Знайти тиск p_2 та температуру t_2 після охолодження повітря.
3. У закритій посудині знаходиться повітря при тиску 750 мм рт. ст. та температурі t_1 = 20 ^{0}С. Визначити падіння тиску у посудині, якщо t_2 = - 30 ^{0}С.
4. У посудині ємністю 1 м^3 знаходиться повітря при p_1 = 5 бар та температурі t_1 = 20 ^{0}С. Як зміниться температура та тиск повітря, якщо до повітря підвести 175 кДж теплоти?
5. У посудині ємністю V = 200 л знаходиться кисень при p_1 = 0,6 МПа та температурі t_1 = 27 ^{0}С. Визначити кількість теплоти, яка необхідна для підвищення температури до 200 ^{0}С. Залежність теплоємності від температури вважати сталою.
6. 3 кг повітря в ізохорному процесі нагрівають від 20 ^{0}С до 323 К. Визначити кількість теплоти, яка необхідна для підігрівання повітря, зміну внутрішньої енергії газу, якщо k = 1,4, а молярна маса повітря 29 кг/кмоль.
7. У посудині ємністю 6 м^3 знаходиться газ SO_2 при тиску p_1 = 0,2 МПа та температурі t_1 = 37 ^{0}С. Газ нагрівається до тиску p_2 = 0,9 МПа. Визначити параметри газу в кінці процесу та кількість підведеної теплоти.
8. У закритій посудині ємністю V = 10 м^3 азот нагріли до температури t_1 =1450 ^{0}С при цьому тиск дорівнював p_1 = 3,8 МПа. Потім газ охолодили до температури t_2 = 47 ^{0}С. Визначити кінцевий тиск p_2 та кількість теплоти, що пішла на охолодження.
9. У резервуарі ємністю 1 м^3 знаходиться повітря при тиску 0,5 МПа і температурі 20 ^{0}С. Як зміняться температура і тиск повітря, якщо до нього підвести 175 кДж теплоти?
10. Балон ємністю 60 л заповнений киснем. Абсолютний тиск кисню 100 бар і температура 15 ^{0}С. Визначити кінцевий тиск і підведену кількість теплоти до кисню, якщо температура підвищиться до 40 ^{0}С.

«Ізобарний процес»

1. Визначити кількість теплоти для нагрівання газу при сталому тиску 4 бар від t_1 = 283 К до t_2 = 40 ^{0}С, якщо газова стала 488 Дж/(кг·К). Об'ємна витрата газу на вході у теплообмінник V = 720 м^3/год.
2. В циліндрі двигуна внутрішнього згорання температура газу підвищилась з 500 ^{0}С до 1500 ^{0}С. Визначити роботу розширення 1 кг газу при p = const. Газ має властивості повітря.
3. 2 м^3 азоту з температурою t_1 = 17 ^{0}С розширюється при p = const до 5 м^3 внаслідок підведення теплоти у 1000 кДж. Визначити тиск азоту у процесі, роботу розширення та кінцеву температуру.
4. 5 кг азоту охолоджується при постійному об'ємі так, що тиск газу зменшується в 1,1 рази, температура стає 7 ^{0}С. Потім азот нагрівається до початкової температури при p = const. Об'єм газу збільшується до 2,28 м^3. визначити тиск азоту у початковому стані.
5. В результаті підведення до кисню 234 кДж теплоти, його об'єм збільшується від 2 м^3 до 3 м^3. Початкова температура t_1 = 10 ^{0}С. Визначити: кінцеву температуру кисню, роботу розширення, якщо процес відбувається при p = const.
6. 1 кг газу СО розширюється при сталому тиску 5 кПа та здійснює роботу у 4,6 кДж. Початкова температура t_1 = 17 ^{0}С. Визначити кінцевий об'єм газу та зміну ентальпії, ентропії.
7. Від 120 л повітря у процесі при сталому тиску 0,2 МПа відводиться теплота зі зниженням температури від t_1 = 200 ^{0}С до t_2 = 0 ^{0}С. Визначити кількість відведеної теплоти, роботу стиснення, зміну внутрішньої енергії. Зобразити графічно процес у відповідності масштабу в p-v діаграмі.
8. За час ізобарного стиснення 10 кг кисню при t_1 = 100 ^{0}С його об'єм змінюється в 1,25 рази. Визначити роботу стиснення та кількість відведеної теплоти. Зобразити графічно процес у відповідності масштабу в T-s діаграмі.
9. В результаті підведення теплоти до 20 кг повітря при t_1 = 27 ^{0}С в процесі при сталому тиску p = 0,3 МПа, об'єм повітря збільшився в 1,5 рази. Визначити кінцеву температуру t_2, кількість теплоти, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та роботу розширення.
10. 5 м^3 повітря підігрівають в процесі p = const від t_1 = 20 ^{0}С до t_2 = 150^{0}С. Тиск за манометром дорівнює 5 бар. Визначити підведену теплоту та роботу, яка виконується в процесі. Теплоємність газу вважати сталою.

«Ізотермічний прцес»

1. 25 кг повітря при t = 27 ^{0}C ізотермічно стискаються до тиску p_2 = 45 бар, при цьому витрачається робота у 8000 кДж. Визначити p_1, v_1, v_2. Зобразити процес у відповідності масштабу в p-v та T-s координатах.
2. При ізотермічному розширенні 0,3 м^3 кисню його тиск зменшується з 3 бар до 1 бара. Визначити кінцевий об'єм, роботу розширення, якщо t_1 = 37 ^{0}C. Зобразити процес у відповідності масштабу в p-v та T-s координатах.
3. Визначити роботу у процесі ізотермічного стиснення 2 кг азоту від p_1 = 3 бар до p_2 = 9,4 бар при температурі t_1 = 200 ^{0}C. Як зміниться робота, якщо температуру газу знизити від 200 ^{0}C до 100 ^{0}C.
4. До 500 л повітря при p_1 = 1,2 МПа та температурі t_1 = 250 ^{0}C додається 140 кДж теплоти при постійній температурі. Визначити p_2, v_2. Зобразити процес у відповідності масштабу в p-v та T-s координатах.
5. 8 кг повітря при тиску p_1 = 2 бар та температурі t_1 = 30 ^{0}C ізотермічно стискаються до 1/3 від початкового об'єму v_1. Визначити p_2 та роботу процесу. Зобразити процес у відповідності масштабу в p-v та T-s координатах.
6. 5 кг повітря ізотермічно стискаються при температурі 300 К від v_1 = 0,1 м^3/кг до v_2 = 0,05 м^3/кг. Початковий тиск p_1 = 12 МПа. Визначити кінцевий тиск p_2, теплоту та роботу процесу, зміну внутрішньої енергії. Зобразити процес у відповідності масштабу в T-s координатах.
7. 2 кг повітря ізотермічно стискаються при t_1 = 17 ^{0}C, тиск змінюється від 0,1 до 1 МПа. Визначити v_2, роботу стиснення та кількість відведеної теплоти у процесі. Зобразити процес у відповідності масштабу в T-s координатах.
8. 1 кг азоту ізотермічно стискається, потім ізобарно розширюється до початкового об'єму v_1 та температури t_3 = 125 ^{0}C. Початковий стан визначається t_1 = 27 ^{0}C, p_1 = 10^5 Па. Визначити v_2 у кінці процесу стиснення, роботу стиснення та розширення. Процеси зобразити у відповідності масштабу в p-v та T-s діаграмах.
9. 1 кг CO_2 ізотермічно стискається при t_1 = 20 ^{0}C до v_1/ v_2 = 10. Визначити p_2, роботу стиснення та відведену теплоту у процесі, якщо p_1 = 1 бар.
10. 8 м^3 повітря при p_1 = 0,09 МПа та t_1 = 20 ^{0}C ізотермічно стискаються до p_2 = =0,81 МПа. Визначити кінцевий об'єм, роботу стиснення та кількість теплоти процесу. Зобразити процес у відповідності масштабу в p-v, T-s діаграмах.

«Адіабатний процес»

1. 10 кг повітря при температурі t_1 = 27 ^{0}C адіабатно охолоджується до t_2 = -40 ^{0}C, тиск падає до 750 мм рт. ст. Після охолодження повітря стискається до початкового тиску у процесі з постійною температурою. Визначити p_1 та роботу розширення, об'єм після ізотермічного стиснення, роботу стиснення. Зобразити процес у відповідності масштабу в *p - v, T - s* діаграмах.
2. 1 кг азоту адіабатно стискається від температури t_1 = 20 ^{0}C та p_1 = 1000 гПа до тиску p_2 = 5000 гПа. Визначити об'єм, температуру в кінці стиснення, роботу процесу. Зобразити процес у відповідності масштабу в *p-v, T-s* діаграмах.
3. Повітря адіабатно розширюється від температури T_1 = 300 К до T_2 = 200 К та p_2 = 0,08 МПа. Визначити p_1 та роботу процесу. Зобразити процес у відповідності масштабу в *p- v* діаграмі.
4. 2 кг CO_2 адіабатно розширюються; робота розширення дорівнює 126 кДж. Початковий об'єм v_1 = 0,016 м^3/кг, тиск p_1 = 5 МПа. Визначити кінцеву температуру газу. Зобразити процес у відповідності масштабу в *p-v, T-s* діаграмах.
5. В процесі адіабатного стиснення деякого двоатомного газу його внутрішня енергія збільшилась на 9,8 кДж. Початковий тиск газу p_1 = 980 кПа та об'єм 10 л. Визначити кінцевий об'єм газу.
6. 4 кг повітря при тиску p_1 = 0,1 МПа та температурі t_1 = 17 ^{0}C адіабатно стискається у циліндрі компресора до тиску p_2 = 0,8 МПа. Визначити кінцеву температуру t_2 та роботу процесу. Зобразити процес у відповідності масштабу в *p-v, T-s* діаграмах.
7. 1 кг азоту адіабатно стискається при температурі t_1 = 17 ^{0}C та p_1 = 0,1 МПа до тиску p_2 = 0,8 МПа. Визначити кінцеву температуру t_2 та об'єм v_2, роботу процесу. Зобразити процес у відповідності масштабу в *p-v, T-s* діаграмах.
8. 1 кг CO стискаються адіабатно від 0,1 МПа до p_2 = 10 бар. На стинення газу витрачається робота 210 кДж/кг. Визначити початкову температуру t_1, та кінцеву t_2, зміну внутрішньої енергії. Зобразити процес у відповідності масштабу в *p-v, T-s* діаграмах.
9. Газ CO_2 при температурі t_1 = 27 ^{0}C адіабатно стискається до об'єму v_2, який дорівнює 1/7 початкового об'єму, потім газ розширюється ізотермічно до початкового об'єму. Визначити роботу адіабатного та ізотермічного процесів. Зобразити процеси у відповідності масштабу в *p-v, T-s* діаграмах.
10. 12 кг CO_2 при тиску p_1 = 1 бар, температурі t_1 = 17 ^{0}C адіабатно стискаються до p_2 = 8 бар. Визначити кінцевий об'єм, температуру та роботу процесу. Показати графічно процес у відповідності масштабу в *p-v, T-s* діаграмах.

Контрольна робота

Контрольна робота охоплює понад 80% теоретичного матеріалу курсу. Тому до виконання контрольної роботи слід приступати лише після ретельного вивчення теорії. Перед виконанням контрольної роботи рекомендується ознайомитись із розв'язком аналогічних задач за навчальною літературою.

При виконанні контрольної роботи необхідно додержуватися таких умов: виписувати умови задачі та вихідні дані, розв'язок супроводжувати коротким пояснювальним текстом, у якому вказувати, яка величина визначається і за якою формулою, які величини підставляються у формулу і звідки вони беруться (з умов, із довідника або визначені раніше тощо), показувати хід розв'язку та обов'язково вказувати розмірності величин як вихідних даних, так і результатів. Після розв'язку слід зробити короткий аналіз отриманих результатів та висновки. Завжди, якщо це можливо, необхідно здійснювати контроль і оцінювати достовірність одержаних чисельних результатів.

Задача 1

Атмосферне сухе повітря складається з 21 % кисню O_2 та 79 % азоту N_2 (інші гази в повітрі не враховуються). Визначити масовий склад повітря, його питому газову постійну, щільність, середню молярну масу та парціальний тиск кисню та азоту.

Вихідні дані для розв'язання задачі наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані

Остання цифра залікової книжки	Тиск $p_{ат}$, мм. рт.ст.	Передостання цифра залікової книжки	Температура T, К
0	760	0	273,15
1	800	1	387,30
2	840	2	476,70
3	880	3	285,17
4	920	4	298,70
5	860	5	349,54
6	820	6	300,00
7	780	7	423,15
8	740	8	400,00
9	700	9	409,72

Задача 2

Суміш, що складається з M_1 кіломолей азоту і M_2 кіломолей кисню з початковими параметрами p_1 = 1 МПа, T_1 = 1000 К розширюється до тиску p_2. Розширення може здійснюватися по ізотермі, адіабаті і політропі з показником n. Визначити газову сталу суміші, її масу і початковий об'єм, кінцеві параметри суміші, роботу розширення і теплоту, що бере участь у процесі.

Дати зведену таблицю результатів та її аналіз. Показати процеси в *p-v* – та *T-s* – діаграмах. Вихідні дані, що необхідні для розв'язання, наведені в табл.2.

Вказівка. Показник адіабати, а отже, і теплоємності C_p та C_v треба прийняти постійними, які не залежать від температури.

Таблиця 2 – Вихідні дані

Остання цифра залікової книжки	M_1, кмоль	M_2, кмоль	Передостання цифра залікової книжки	P_2, МПа	n
0	0,1	0,9	0	0,43	1,2
1	0,2	0,8	1	0,4	1,3
2	0,3	0,7	2	0,35	1,5
3	0,4	0,6	3	0,33	1,6
4	0,5	0,5	4	0,31	1,7
5	0,6	0,4	5	0,47	1,1
6	0,7	0,3	6	0,54	0,5
7	0,8	0,2	7	0,57	0,8
8	0,9	0,1	8	0,62	0,7
9	0,5	0,5	9	0,66	0,6

Задача 3

Яку кількість теплоти необхідно підвести до повітря в замкненому сосуді об'ємом V_1. Визначити також масу повітря та кінцевий тиск.

Вихідні дані для розв'язання задачі наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Вихідні дані

Остання цифра залікової книжки	t_1, ^{0}C	t_2, ^{0}C	Передостання цифра залікової книжки	p_2, кПа	V_1, м^3
0	100	500	0	300	0,50
1	125	550	1	250	0,75
2	150	600	2	275	1,00
3	175	575	3	375	1,25
4	200	625	4	425	1,50
5	250	525	5	200	1,75
6	300	700	6	400	2,00
7	325	675	7	225	2,25
8	375	750	8	470	2,50
9	400	775	9	325	2,75

Задача 4

Кисень у кількості 5 кг при початковому тиску p_1 та початковій температурі t_1 розширюється по політропі до кінцевого тиску p_2 та кінцевої температури t_2. Визначити показник політропи, початковий та кінцевий об'єми,

роботу розширення, кількість підведеної теплоти, зміну внутрішньої енергії та зміну ентропії. Вихідні дані для розв'язання задачі наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Вихідні дані

Остання цифра залікової книжки	p_1, кПа	p_2, кПа	Передостання цифра залікової книжки	t_1, ^{0}C	t_2, ^{0}C
0	2000	100	0	427	27
1	2100	150	1	358	52
2	2400	200	2	652	33
3	2900	250	3	433	58
4	3200	300	4	487	24
5	3500	350	5	324	87
6	4000	400	6	641	41
7	4300	450	7	549	45
8	4600	500	8	318	49
9	5100	550	9	645	18

Задача 5

Повітря в теплообміннику із зустрічною течією нагрівається від температури t_1, а гази охолоджуються від температури t_3 до температури t_4. Теплові втрати теплообмінника залежать від кількості теплоти, що віддає газ. Визначити втрату працездатності на 1 кг газу, що проходить, внаслідок необоротного теплообміну. Газ та повітря вважати ідеальними газами, які мають властивості повітря. Теплоємність повітря та газів вважати величинами постійними. Температура навколишнього середовища t_0 = 25 ^{0}C. Вихідні дані для розв'язання задачі наведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Вихідні дані

Остання цифра залікової книжки	t_1, ^{0}C	t_3, ^{0}C	Передостання цифра залікової книжки	t_4, ^{0}C	Теплові витрати, %
0	40	450	0	200	20
1	45	475	1	210	24
2	50	500	2	240	29
3	55	525	3	270	32
4	60	550	4	300	37
5	65	575	5	330	41
6	70	600	6	360	46
7	75	625	7	390	50
8	80	650	8	410	55
9	90	675	9	440	58

Задача 6

Визначити масу та ентальпію вологого повітря зі ступенем вологості x_0 та тиском p. Вихідні дані для розв'язання задачі наведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Вихідні дані

Остання цифра залікової книжки	V, м^3	p, Мпа	Передостання цифра залікової книжки	x_0, %
0	0,5	1,0	0	10
1	0,75	1,5	1	15
2	1,0	2,25	2	20
3	1,25	2,75	3	25
4	1,5	3,0	4	30
5	1,75	3,5	5	35
6	2,0	4,25	6	40
7	2,25	4,5	7	45
8	2,5	4,75	8	50
9	2,75	5,0	9	55

Задача 7

Визначити годинну витрату пару D (кілограмів на годину) та питому витрату пару d (кілограмів на кіловат-годину) на конденсаційну парову турбіну, що працює без регенерації теплоти, по заданій електричній потужності турбогенератора $N_{ел}$, тиску p_1 та температурі t_1 перегрітої пари перед турбіною та відносному внутрішньому ККД турбіни η_{oi}. Тиск в парі конденсатора прийняти $p_2 = 4$ кПа. Механічний ККД турбіни $\eta_м$ та ККД електрогенератора η_e прийняти $\eta_м = \eta_e = 0,99$. Визначити також ступінь сухості пари в кінці теоретичного і дійсного процесів розширення (зобразивши процеси h-s-діаграми) та абсолютний ККД турбогенератора. Потужністю приводу насосу знехтувати. Вихідні дані, необхідні для розв'язання задачі наведені в табл. 7.

Зобразити схему паросилової установки і навести її короткий опис. Пояснити, як впливають початкові та кінцеві параметри пари на ККД циклу Ренкіна, а також на ступінь сухості пари в кінці розширення (X_2). Вказати, які мінімально допустимі значення X_2 та чому.

Таблиця 7 – Вихідні дані

Остання цифра залікової книжки	$N_{ел}$, МВт	η_{oi}	Передостання цифра залікової книжки	p, МПа	t_1, ^{0}С
0	100	0,76	0	8,5	500
1	120	0,77	1	9,5	510
2	140	0,79	2	9,2	515
3	160	0,81	3	12	540
4	180	0,83	4	12	520
5	200	0,85	5	13	540
6	170	0,84	6	13	520
7	130	0,82	7	14	540
8	150	0,8	8	8,6	480
9	190	0,86	9	9	500

Завдання 1. Термодинамічні процеси ідеальних газів. Суміші ідеальних газів

Задача 1

Вважаючи теплоємність газів лінійно залежною від температури, визначити:

- параметри газу в початковому та кінцевому стані (p, V, T);
- зміну внутрішньої енергії та ентропії (ΔU, ΔS);
- роботу розширення L;
- теплоту, яка бере участь у процесі, Q.

Побудувати процес на p-V та T- S-діаграмах.

Вихідні дані наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані для задачі 1

Перша цифра варіанта	Газ	p_1, МПа	m, кг	Друга цифра варіанта	Процес	t_1, ^{0}C	t_2, ^{0}C
0	O_2	1	2	0	Ізохорний	2400	400
1	N_2	4	5	1	Ізобарний	2200	300
2	H_2O	2	10	2	Адіабатний	2000	300
3	N_2	3	4	3	Ізохорний	1800	500
4	CO	5	6	4	Ізобарний	1600	400
5	CO_2	6	8	5	Адіабатний	1700	100
6	N_2	8	3	6	Ізохорний	1900	200
7	H_2O	10	12	7	Ізобарний	2100	500
8	O_2	12	7	8	Адіабатний	2300	300
9	CO	7	9	9	Ізохорний	1500	100

Задача 2

Суміш газів складається з n_1 кіломолей азоту та n_2 кіломолей кисню з початковими параметрами: p_1 = 1,0 МПа та T_1 = 1000 К і розширюється до тиску p_2. Розширення може проходити за ізотермою та адіабатою. Визначити:

- масу суміші $m_{сум}$;
- газову сталу суіші $R_{сум}$;
- початковий об'єм V_1;
- кінцеві параметри V_2 та T_2;
- роботу розширення L;
- теплоту процесу Q;
- зміну ентропії ΔS.

Показник адіабати та теплоємності враховувати постійними і незалежними від температури.

Побудувати процеси на p-V та T- S-діаграмах.

Вихідні дані наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Вихідні дані для задачі 2

Перша цифра варіанта	p_2, МПа	Друга цифра варіанта	n_1, кмоль	n_2, кмоль
0	0,43	0	0,1	0,9
1	0,40	1	0,2	0,8
2	0,35	2	0,3	0,7
3	0,33	3	0,4	0,6
4	0,31	4	0,5	0,5
5	0,47	5	0,6	0,4
6	0,54	6	0,7	0,3
7	0,57	7	0,8	0,2
8	0,62	8	0,9	0,1
9	0,66	9	0,5	0,5

Завдання 2. H-*s* – діаграма водяної пари. Дроселювання

Водяна пара має початкові параметри p_1 = 5 МПа та x_1 = 0,9. Вона нагрівається при постійному тиску до температури t_2, а потім дроселюється до тиску p_3. При тиску p_3 пара попадає до сопла Лаваля, де розширюється до тиску p_4 = 5кПа.

Користуючись *h-s* – діаграмою, визначити:

- кількість теплоти, яку необхідно підвести до пари для нагрівання її до температури t_2;
- зміну внутрішньої енергії на кожному етапі;
- кінцеву температуру t_3 в процесі дроселювання;
- кінцеві параметри та швидкість на виході із сопла;
- витрату пари при розширенні від p_3 до p_4.

Усі процеси побудувати на *h-s* – діаграмі.

Вихідні дані наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Вихідні дані

Перша цифра варіанта	p_3, МПа	Площа перерізу сопла f_{min}, см^2	Друга цифра варіанта	t_2, ^{0}C
0	1,4	10	0	300
1	1,3	20	1	330
2	1,2	30	2	370
3	1,1	40	3	400
4	1,0	50	4	420
5	0,9	60	5	460
6	0,8	70	6	500
7	0,7	80	7	570
8	0,6	90	8	550
9	0,5	100	9	600

Завдання 3. Теплопередача

Задача 1

Плоска стальна стінка товщиною δ_1 з теплопровідністю сталі $\lambda_1 = 40$ Вт/(м·К) з однієї сторони омивається газами з коефіцієнтом тепловіддачі α_1, а з другої сторони стінка ізольована шаром ізоляції товщиною δ_2 з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_2 = 0{,}15$ Вт/(м·К). Коефіцієнт тепловіддачі від шару ізоляції до повітря α_2. Задані також температури газу $t_г$ та повітря $t_п$. Визначити:

- густину теплового потоку q;
- температури $t_{ст}'$, $t_ш'$ та $t_{ст}''$.

Вихідні дані наведено в табл. 4.

Навести рисунок з позначенням температур.

Таблиця 4 – Вихідні дані до задачі 1

Перша цифра варіанта	δ_2, мм	α_2, Вт/(м^2·К)	$t_п$, ^{0}С	Друга цифра варіанта	δ_1,мм	α_1, Вт/(м^2·К)	$t_г$, ^{0}С
0	10	5	30	0	5	35	350
1	12	6	25	1	6	45	400
2	14	7	20	2	7	40	370
3	16	8	15	3	8	30	350
4	18	9	10	4	9	35	330
5	20	10	5	5	10	25	300
6	22	9	0	6	6	42	380
7	24	8	-5	7	5	30	320
8	26	6	-10	8	3	34	400
9	28	5	-20	9	4	38	280

Задача 2

Повітря рухається всередині труби при температурі $t_п$ та швидкості ω, внутрішній діаметр труби d_1, товщина стінки труби δ, а теплопровідність стінки $\lambda = 20$ Вт/(м·К).

Зовнішня поверхня труби омивається гарячими газами, температура газів t_2, коефіцієнт тепловіддачі до труби α_2. Визначити:

- коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до повітря α_1;
- тепловий потік на 1 м довжини труби.

Вихідні дані наведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Вихідні дані для задачі 2

Перша цифра варіанта	d_1, мм	δ, мм	$t_{п,}$ ^{0}C	Друга цифра варіанта	$t_{2,}$ ^{0}C	α_2, Вт/(м^2·К)	ω, м/с
0	70	3	150	0	500	20	10
1	80	5	200	1	550	20	9
2	60	4	180	2	600	40	6
3	40	3	100	3	650	50	8
4	20	2	150	4	700	40	10
5	50	3	200	5	750	60	12
6	80	5	250	6	800	50	14
7	60		200	7	780	40	16
8	40		150	8	740	30	18
9	20		100	9	520	20	20

Завдання для контрольних робіт

Варіант № 1

1. Газ масою m = 0,5 кг з параметрами p_1 = 0,5 МПа, і v_1 = 0,1 м^3/кг знаходиться у циліндрі з поршнем. У результаті процесу, рівняння якого pv = const, газ переходить у стан, який характеризується параметром v_2 = 0,3 м^3/кг. Визначити роботу при оборотному протіканні процесу (кДж).

2. Залежність теплоємності газу N_2 від температури у процесі v = const визначають співвідношенням c = 20,223 + 0,00539t, кДж/(кмоль·К). Визначити теплоту (кДж/кг) і середню теплоємність процесу (кДж/(кгК)) при охолодженні газу у закритому балоні від температури t_1 = 600 до t_2 =150 ^{0}C.

3. У посудину, яка містить 10 кг води при температурі 20 ^{0}C, поміщено електро-нагрівач, потужність якого 1,5 кВт. Визначити, за який час (хв) вода нагріється до температури 100 ^{0}C, теплоємність води 4,19 кДж/(кг·К). Теплові втрати в навколишнє середовище – 10%.

4. Газ N_2 масою 1,5 кг змінює свій стан під час процесу відповідно до умови задачі 2. Визначити роботу і зміну внутрішньої енергії газу (кДж). Побудувати схему енергобалансу.

Варіант № 2

1. Газ масою 0,3 кг з параметрами p_1 = 0,2 МПа, v_1 = 0,4 м^3/кг знаходиться у циліндрі з поршнем. У результаті процесу, рівняння якого pv = const переходить у стан, який характеризують параметром p_2 = 0,8 МПа. Визначити роботу (кДж) при оборотному протіканні процесу.

2. Залежність мольної теплоємності газу O_2 від температури під час процесу p = const визначають співвідношенням c =21,266 + 0,00697t (Дж/(кмоль·К). Знайти теплоту (кДж/кг) і середню теплоємність процесу (кДж/(кг·К)) під час нагрівання газу у закритому балоні від температури t_1 = 0 до t_2 = 300 ^{0}C.

3. У посудину, яка містить 2,5 кг води при температурі 20 ^{0}С, поміщено електронагрівач потужністю 0,6 кВт. Визначити, за скільки хвилин вода нагріється до температури 100 ^{0}С, теплоємність води 4,19 кДж/(кг·К). Втрати теплоти у навколишнє середовище – 20%.

4. Газ O_2 масою 3,5 кг змінює свій стан під час процесу відповідно до умови задачі 2. Визначити роботу і зміну внутрішньої енергії газу (кДж). Побудувати схему енергобалансу.

5. Внутрішня енергія робочого тіла зменшилась на 50 кДж, ентальпія на 70 кДж. Визначити теплоту (кДж) і наявну роботу (кДж) за ізохорної зміни стану.

Варіант № 3

1. У оборотному процесі потенціальна енергія тиску змінилась від 300 до 200 кДж. Наявна робота дорівнює 600 кДж. Визначити роботу зміни об'єму (кДж).

2. У рівноважному ізохорному процесі зміни стану газу (теплоємність C_v =1,0 кДж/(кгК) з відведенням 150 кДж/кг теплоти, початкова температура T_1 = 500 К. Знайти температуру T_2 у кінці процесу.

3. У ізобарному процесі зміна внутрішньої енергії газу дорівнює 100 кДж, при цьому від навколишнього середовища підводиться 500 кДж теплоти. Визначити роботу газу (кДж). Чи дотримуються під час процесу умови оборотності, якщо p = 0,2 Па, v_1 = 0,5 м^3, v_2 = 2,5 м^3. Знайти роботу при оборотному протіканні процесу.

4. До газу, який знаходиться у циліндрі під рухомим поршнем (p = const) з зовні підводиться 500 кДж теплоти. При цьому виконується питома робота 200 кДж/кг. Визначити зміну внутрішньої енергії (кДж), якщо маса газу 2 кг.

5. Газ зі стану 1 переходить у стан 2 шляхом 1-2. При цьому до газу підводиться 50 кДж теплоти і над газом виконується 200 кДж роботи. Якими будуть робота (кДж) і знак зміни об'єму у деякому процесі 2-I, в якому відводиться 100 кДж теплоти?

Варіант № 4

1. Газ при p = 1000 кПа і густині ρ_1 = 2 кг/м^3, ізобарно стискується, зменшуючи об'єм газу у 5 разів. Визначити роботу оборотного процесу (кДж/кг).

2. У оборотному ізотермічному процесі при температурі t = 300 ^{0}С ентропія 12 кг газу збільшується на 0,5 кДж/ (кгК). Визначити теплоту процесу (кДж).

3. У процесі p = const об'єм v_1 = 1 м^3 газу при p_1 = 2 бар збільшився у 4 рази. Робота процесу дорівнює 500 кДж. Чи дотримуються під час процесу умови оборотності? Визначити роботу (кДж) в разі оборотного протікання процесу.

4. Внутрішня енергія робочого тіла зменшилась на 100 кДж, ентальпія на 130 кДж. Визначити теплоту (кДж) і наявну роботу в разі ізохорної зміни стану.

5. У адіабатному процесі внутрішня енергія робочого тіла збільшується на 200 МДж, а ентальпія на 250 МДж. Визначити (МДж) теплоту, роботу зміни об'єму і наявну роботу процесу.

Варіант № 5

1. У оборотному процесі p = const газ з об'ємом $v_1 = 1$ м^3 при $p_1 = 300$ кПа розширюється у 3 рази. Визначити роботу процесу (кДж).

2. Визначити теплоту процесу (кДж), теплоємність якого визначається виразом $c = 1{,}2 + 2 \cdot 10^4$ Т, кДж/(кгК), в разі зміни температури 10 кг робочого тіла у процесі від 300 до 700 К.

3. При ізотермічному процесі $T = 500$ К зміни стану системи, робота дорівнює 2000 кДж. Зміна внутрішньої енергії системи 700 кДж, Визначити теплоту процесу (кДж). Чи виконуються під час процесу умови оборотності, якщо ентропія системи збільшилась на 5 кДж/К? Яким було б значення теплоти (кДж), якби процес протікав оборотно?

4. У ізобарному процесі внутрішня енергія робочого тіла збільшилась на 400 кДж, ентальпія – на 700 кДж. Визначити теплоту і роботу процесу.

5. Круговий процес (цикл) складається з процесів 1-2 і 2-1, сумарна робота циклу 200 кДж; $L_{1\text{-}2} = 300$ кДж; $Q_{1\text{-}2} = 400$ кДж. Знайти в процесі 1-2 внутрішню енергію $U_{1\text{-}2}$, (кДж).

Варіант № 6

1. У оборотному процесі зміни стану робочого тіла, потенціальна енергія тиску змінилась від 100 до 200 кДж. Наявна робота дорівнює 1000 кДж. Визначити роботу зміни об'єму (кДж).

2. У рівноважному ізохорному процесі зміни стану 1 кг газу теплоємність $C_v = 0{,}8$ кДж/ (кгК) з відведенням 80 кДж/кг теплоти, початкова температура $T_1 = 600$ К. Визначити температуру T_2 в кінці процесу.

3. В ізобарному процесі зміна внутрішньої енергії газу дорівнює 200 кДж, при цьому від зовнішнього середовища підводиться 1000 кДж теплоти. Визначити роботу газу (кДж).

4. До газу, який знаходиться у циліндрі під вільним поршнем, у рівноважному процесі з зовні підводиться 1000 кДж теплоти. При цьому газом виконується питома робота 100 кДж/кг. Визначити зміну внутрішньоїенергії (кДж), якщо маса газу 7 кг.

5. Робоче тіло зі стану I переходить у стан 2 шляхом 1-2. При цьому до робочого тіла підводиться 100 кДж теплоти і над ним виконується робота, яка дорівнює 400 кДж. Якими будуть робота (кДж) і знак зміни об'єму в деякому процесі 2-1, під час якого відводиться 300 кДж теплоти?

Завдання 1

Водяна пара, яка має початкові параметри p_1 та ступінь сухості x_1, нагрівається при постійному тиску до температури t_2, потім дроселюється до тиску p_3 . При тиску p_3 пара потрапляє в сопло Лаваля, де розширюється до тиску p_4. Визначити, користуючись H-S діаграмою водяної пари: кількість теплоти процесу 1-2; зміну внутрішньої енергії, а також дросель-ефект процесу 2-3; кінцеву температуру і швидкість на виході із сопла Лаваля, а також витрати пари в процесі витікання 3-4, якщо відома площа мінімального перерізу сопла

f_{min}. Процеси показати на *H-S* діаграмі. Відповісти на запитання: як впливає на кінцевий ступінь сухості x_4 температура t_2, якщо p_3 не змінюється? Дати ескіз профілю сопла.

№ варіанта	p_1, МПа	x_1	t_2, °С	№ варіанта	p_3, МПа	p_4, кПа	$f\text{m}_{in}$, см^2
1	5	0,9	300	1	1,4	3	10
2	6	0,92	330	2	1,3	2	20
3	7	0,96	370	3	1,2	3	30
4	4	0,98	400	4	1,1	4	40
5	3,5	0,91	420	5	1	5	50
6	3,0	0,88	460	6	0,9	6	60
7	2,8	0,86	500	7	0,8	5	70
8	2,6	0,85	530	8	0,7	4	80
9	2,4	0,87	560	9	0,6	3	90
10	4,5	0,95	600	10	0,5	2	120

Примітка: значення $\beta_{кр}$ приймати для перегрітої пари 0,546, для сухої насиченої – 0,5777. Кут конусності частини сопла, що розширюється, $\varphi = 12^0$, довжину частини сопла, що звужується, рівній діаметру найбільш вузького перерізу.

Завдання 2

Розрахувати ідеальний багатоступеневий поршневий компресор для стиснення повітря (без урахування тертя й шкідливого об'єму), продуктивність якого становить *G*, кг/с, при параметрах $P_к$ та $t_k=t_1$, де t_1 − температура навколишнього середовища. Слід визначити: кількість ступенів компресора, ступінь підвищення тиску в кожному ступені, кількість теплоти, відведеної від повітря в циліндрах компресора, в проміжних і кінцевому теплообмінниках (при охолодженні до t_1) та потужність привода, якщо тиск повітря на вході в перший ступінь компресора P_1 і температура t_1, допустиме підвищення температури в кожному ступені Δt, показник політропи *n*, кінцевий тиск $p_к$. У скільки разів збільшиться робота на привід компресора й температура повітря в циліндрі в кінці стиснення, якщо стиснення здійснювати в одноступеневому компресорі. Роботу компресорів показати в *p-V* та *T-S* діаграмах у масштабі, обчисливши параметри в основних точках.

№ варіанта	p_1, МПа	t_1 , °С	Δt, °С	№ варіанта	p_k, МПа	*n*	*G*, кг/с
1	0.1	10	165	1	15	1.23	0.2
2	0.1	15	170	2	16	1.24	0.3
3	0.1	20	175	3	17	1.25	0.4
4	0.1	25	180	4	18	1.26	0.5
5	0.1	30	185	5	19	1.27	0.6
6	0.1	35	190	6	20	1.28	0.7
7	0.1	40	195	7	21	1.29	0.8
8	0.1	45	200	8	22	1.30	0.9
9	0.1	50	205	9	23	1.31	1.0
10	0.1	20	210	10	24	1.32	1.2

Примітка: при розрахунках за допустимими Δt, як правило, отримуємо число ступенів, яке не дорівнює цілому числу (наприклад, 1,3 ; 2,4 та ін.), тому необхідно приймати ціле число (2; 3 й ін.) і для Δt, яке відповідає цілому числу ступенів, проводити всі розрахунки. Повітря вважати сумішшю двоатомних газів: $\mu_{пов}=29$; $\kappa=1{,}4$. Значення теплоємностей прийняти за даними молекулярно-кінетичної теорії (додаток 1). Чисельне значення ентропії для кожного стану може бути розраховано за формулою

$$S_1 = c_p \cdot \ln \frac{T_1}{273} - R \ln \cdot \frac{P_1}{101325} \ ,$$

де T_1 – абсолютна температура в точці, К;

P_1 – абсолютний тиск, Па.

Додатки

Додаток 1

Співвідношення між одиницями тиску

Одиниця	Бар	Паскаль. Па (н/м^2)	Фізична атмосфера, ат (кгс/см^2)	Технічна атмосфера, ат (кгс/см^2)	Міліметр ртутного стовпчика, мм.рт.ст.	Міліметр водяного стовпчика, мм.вод.ст.
1 Бар	1	10^5	1,0197	1,0197	750,1	10197,2
1 Па	10^{-5}	1	$0,987*10^{-5}$	$0,102*10^{-4}$	$750,1*10^{-5}$	0,102
1 атм	1,013	$1,012*10^5$	1	1,033	760	$1,033*10^4$
1 ат	0,981	$9,81*10^4$	0,9678	1	735,6	10^4
1 мм. рт.ст.	0,00133	133,32	$13,16*10^{-4}$	$13,56*10^{-4}$	1	13,595
1 мм. вод.ст.	$0,981*10^{-4}$	9,807	$0,968*10^{-4}$	10^{-4}	$735,6*10^{-4}$	1

Додаток 2

Термо-е.р.с. стандартизованих термопар

t, °С	Термо – е. р. с. , мВ								
	МКн (Т)	ЖКн (J)	ХК (Е)	ХА (К)	ВР5/20 (С)	ВР 10/ 20	ПР10/ 0 (S)	ПР 13/0 (R)	ПР30/6 (В)
100	4,28	5,27	6,898	4,095	1,33	1,00	0,645	0,647	0,033
200	9,28	10,77	14,57	8,137	2,87	2,10	1,440	1,468	0,178
300	14,86	16,32	22,88	12,207	4,52	3,20	2,323	2,400	0,431
400	20,87	21,84	31,48	16,395	6,21	4,30	3,260	3,407	0,786
500		27,39	40,27	20,640	7,91	5,40	4,234	4,471	0,241
600		33,09	49,09	24,902	9,6	6,50	5,237	5,582	1,791
700		39,13	57,82	29,128	11,27	7,60	6,274	6,741	2,430
800		45,50	66,42	33,277	12,93	8,65	7,345	7,949	3,154
900		51,87		37,325	14,56	9,70	8,448	9,203	3,957
1000		57,94		41,269	16,14	10,70	9,585	10,503	4,833
1100		63,78		45,108	17,67	11,70	10,754	11,846	5,777
1200		69,54		48,828	19,15	12,65	11,947	13,224	6,783
1300				52,398	20,58	13,60	13,155	14,624	7,845
1400					21,96	14,50	14,368	16,035	8,952
1500					23,30	15,35	15,576	17,445	10,094
1600					24,59	16,15	16,771	18,842	11,257
1700					25,82	16,90	17,942	20,215	12,426
1800					27,0	17,60			13,585
2000					29,18	18,90			
2200					31,14	20,15			
2400					32,86	21,30			
2500					33,64	21,85			

Температура холодних спаїв для 0 ℃

Додаток 3

Мольні теплоємності газів за даними молекулярно-кінетичної теорії

Газ	μc_v,кДж/кмольК	μc_p,кДж/ кмольК	k
Одноатомні	12.5	20.8	1,67
Двоатомні	20.8	29.1	1,4
Три - і багатоатомні	29.1	37.4	1,29

Додаток 4

Теплофізичні властивості сухого повітря і води

t, °С	Повітря					Вода		
	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м^2/с	$\mu \cdot 10^6$, Н·с/м^2	$\nu \cdot 10^6$, м^2/с	Pr	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м^2/с	Pr
-10	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712	-	-	-
0	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707	0,551	1,789	13,67
10	2,51	20,0	17,6	14,16	0,706	0,574	1,306	9,58
20	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703	0,600	1,006	7,02
30	2,67	22,9	18,6	16,0	0,701	0,617	0,805	5,42
40	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699	0,634	0,659	4,31
50	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698	0,648	0,566	3,54
60	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696	0,659	0,476	2,96
70	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694	0,667	0,415	2,55
80	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692	0,674	0,365	2,21
90	3,13	31,9	21,5	22,1	0,690	0,680	0,326	1,95
100	3,21	33,6	21,9	23,1	0,688	0,682	0,292	1,75
120	3,34	36,8	22,8	25,5	0,686	0,685	0,252	1,47

Додаток 5

Фізичні властивості речовин

Речовина	Хімічна формула	Молекулярна маса μ, кг/кмоль	Густина ρ, кг/см^3	Об’єм кіло моля υ_μ, м^3/кг	Газова стала R, Дж/кг·К
Повітря	-	28,96	1,293	22,40	287,0
Кисень	O_2	32,00	1,429	22,39	259,8
Азот	N_2	28,026	1,251	22,40	296,8
Гелій	He	4,003	0,179	22,42	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водень	H_2	2,016	0,090	22,43	4124,0
Оксид вуглецю	CO	28,01	1,250	22,40	296,8
Діоксид вуглецю	CO_2	44,01	1,977	22,26	188,9
Сірчаний газ	SO_2	64,04	2,926	21,89	129,8
Метан	CH_4	16,032	0,717	22,39	518,8
Етилен	C_2H_4	28,052	1,251	22,41	296,6

Коксовий газ	-	11,50	0,515	22,33	721,0
Аміак	NH_3	17,032	0,771	22,08	488,3
Водяна пара	H_2O	18,016	(0,804)	(22,40)	(461)

Додаток 6

Фізичні властивості деяких матеріалів

Матеріал	*t*, °С	ρ, кг/м^3	λ, Вт/(м • К)
Мідь	0-20	8000	384
Алюміній	0-20	2670	204
Азбест волокно	50	770	0,116
Пісок	50	1500	0,326
Слюда	0-20	290	0,58

Додаток 7

Теплофізичні властивості сухого повітря при нормальному атмосферному тиску за даними [2,5] (μ=28,97 кг/кмоль)

t,°С	ρ, кг/м^3	C_p, кДж/(кг·К)	$\nu \cdot 10^6$, м^2/с	$k = C_p/C_v$	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)
-30	1,453	1,013	10,80	1,403	2,20
-20	1,395	1,009	11,79	1,402	2,28
-10	1,342	1,009	12,43	1,402	2,36
0	1,293	1,005	13,28	1,401	2,44
10	1,247	1,005	14,16	1,401	2,51
20	1,205	1,005	15,06	1,401	2,59
30	1,165	1,005	16,00	1,401	2,67
40	1,128	1,005	16,96	1,401	2,76
50	1,093	1,005	17,95	1,399	2,83
60	1,060	1,005	18,97	1,399	2,90
70	1,029	1,009	20,00	1,397	2,97
80	1,000	1,009	21,09	1,397	3,05
90	0,972	1,009	22,10	1,397	3,13
100	0,946	1,009	23,13	1,397	3,21
120	0,898	1,009	25,45	1,396	3,44
140	0,854	1,013	27,80	1,393	3,49
160	0,815	1,017	30,10	1,390	3,64
180	0,779	1,022	32,49	1,387	3,78
200	0,776	1,026	34,85	1,386	3,93
250	0,674	1,038	40,60	1,384	4,27
300	0,615	1,047	48,33	1,379	4,61
350	0,566	1,059	55,46	1,373	4,91
400	0,524	1,068	63,09	1,368	5,21
500	0,456	1,093	79,38	1,357	5,74
600	0,404	1,114	96,89	1,347	6,22
700	0,362	1,135	115,4	1,338	6,71
800	0,329	1,156	134,8	1,331	7,18

Додаток 8

Суха насичена пара і вода на кривій насичення (по тисках)

p, МПа	$t_н$, ^{0}C	v', м^3/кг	v'', м^3/кг	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	r, кДж/кг	s', кДж/(кгК)	s'', кДж/(кгК)
0,0010	6,936	0,0010001	130,04	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,0020	17,486	0,0010014	67,24	73,40	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,0040	28,95	0,0010042	34,93	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,0060	36,17	0,0010065	23,77	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,0080	41,53	0,0010085	18,13	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2263
0,0100	45,82	0,0010102	14,70	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,014	52,57	0,0010132	10,69	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	0,0305
0,018	57,82	0,0010159	8,448	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445
0,020	60,08	0,0010171	7,652	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,040	75,87	0,0010264	3,999	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,060	85,94	0,0010330	2,734	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,080	93,50	0,0010385	2,089	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,10	99,62	0,0010432	1,696	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
0,14	109,31	0,0010509	1,237	458,42	2690,1	2231,7	1,4109	7,2460
0,20	120,23	0,0010606	0,8860	504,74	2706,8	2202,0	1,5306	7,1279
0,24	126,09	0,0010659	0,7469	529,9	2714,9	2185,0	1,5931	7,0658
0,30	133,54	0,0010733	0,6055	661,7	2725,5	2163,9	1,6716	6,9922
0,40	143,62	0,0010836	0,4623	604,6	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
0,50	151,84	0,0010927	0,3749	640,1	2748,8	2108,7	1,8605	6,8221
1,0	179,88	0,0011273	0,1945	742,7	2777,7	2031,0	2,0945	6,6223
1,5	198,28	0,0011538	0,1317	844,5	2791,8	1947,3	2,3148	6,4458
2,0	212,37	0,0011768	0,09961	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
3,0	233,87	0,0012164	0,06863	1008,4	2803,1	1794,7	2,6455	6,1859
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
6,0	275,56	0,0013185	0,03243	1213,9	2784,4	1570,5	3,0276	5,8894
8,0	294,98	0,0013838	0,02352	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
10,0	310,96	0,0014522	0,01803	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
12,0	324,64	0,001527	0,01426	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,4930
14,0	336,63	0,001611	0,01149	1570,8	2637,9	1067,0	3,6233	5,3731
18,0	356,96	0,001839	0,00750	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
22,0	373,71	0,00269	0,00378	2009,7	2195,6	185,9	4,2943	4,5815
22,1	374,15	0,00326	0,00326	2084,0	2084,0	0	4,4062	4,4062

Додаток 9

Насичена пара і вода на лінії насичення (по температурах)

$t_н$, ^{0}C	p, МПа	v', м^3/кг	v'', м^3/кг	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	r, кДж/кг	s', кДж/(кгК)	s'', кДж/(кгК)
0	0,0006108	0,0010002	206,321	-0,04	2501,0	2501,0	-0,0002	9,1565
10	0,0012271	0,0010003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	9,9009
20	0,0023368	0,0010017	57,833	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674
30	0,0042417	0,0010043	32,929	125,66	2555,9	2430,2	0,4365	8,4537
40	0,0073749	0,0010078	19,548	167,45	2574,0	2406,5	0,5721	8,2576
50	0,012335	0,0010121	12,048	209,26	2591,8	2382,5	0,7035	8,0771
60	0,019919	0,0010171	7,6807	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106
70	0,031161	0,0010228	5,0479	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565
80	0,047369	0,0010292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135
90	0,070108	0,0010361	2,3624	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,4805
100	0,101325	0,0010437	1,6738	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,3564
120	0,19854	0,0010606	0,89202	503,07	2706,6	2202,9	1,5276	7,1310
140	0,36136	0,0010801	0,50875	589,1	2734,0	2144,9	1,7390	6,9307
160	0,61804	0,0011022	0,30685	675,5	2757,7	2082,2	1,9425	6,7498
180	0,10027	0,0011275	0,19381	763,1	2777,1	2014,0	2,1393	6,5838
200	1,5551	0,0015665	0,12714	852,4	2791,4	1939,0	2,3307	6,4289
220	2,3201	0,0011900	0,08602	943,7	2799,9	1856,2	2,5178	6,2819
240	3,3480	0,0012291	0,05964	1037,6	2801,6	1764,0	2,7021	6,1397
260	4,6940	0,0012756	0,04212	1135,0	2795,2	1660,2	2,8850	5,9989
280	6,4191	0,0013324	0,03010	1237,0	2778,6	1541,6	3,0687	5,8555
300	8,5917	0,0014041	0,02162	1345,4	2748,4	1403,0	3,2559	5,7038
320	11,290	0,0014995	0,01544	1463,4	2699,6	1236,2	3,4513	5,5356
340	14,608	0,0016390	0,01078	1596,8	2622,3	1025,5	3,6638	5,3363
360	18,674	0,0018930	0,006970	1763,1	2485,7	722,6	3,9189	5,0603
374	22,084	0,002834	0,003482	2039,2	2150,7	111,5	4,3374	4,5096

Примітка. Параметри критичного стану: тиск 22,115 МПа, температура 374,12 ^{0}C, питомий об’єм 0,003147 м^3/кг.

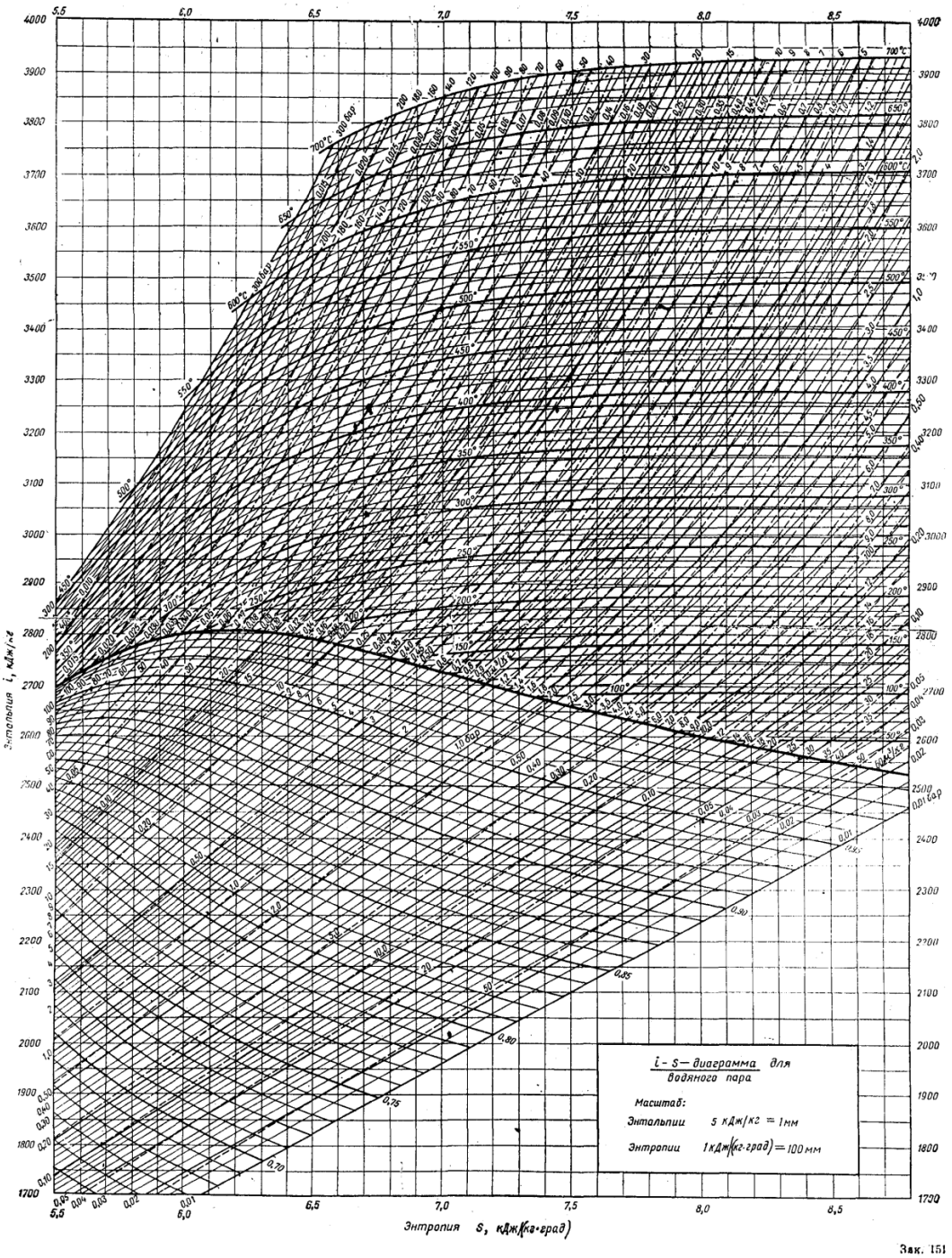
Додаток 10

Питомі об’єми і ентальпії перегрітої водяної пари при різних тисках

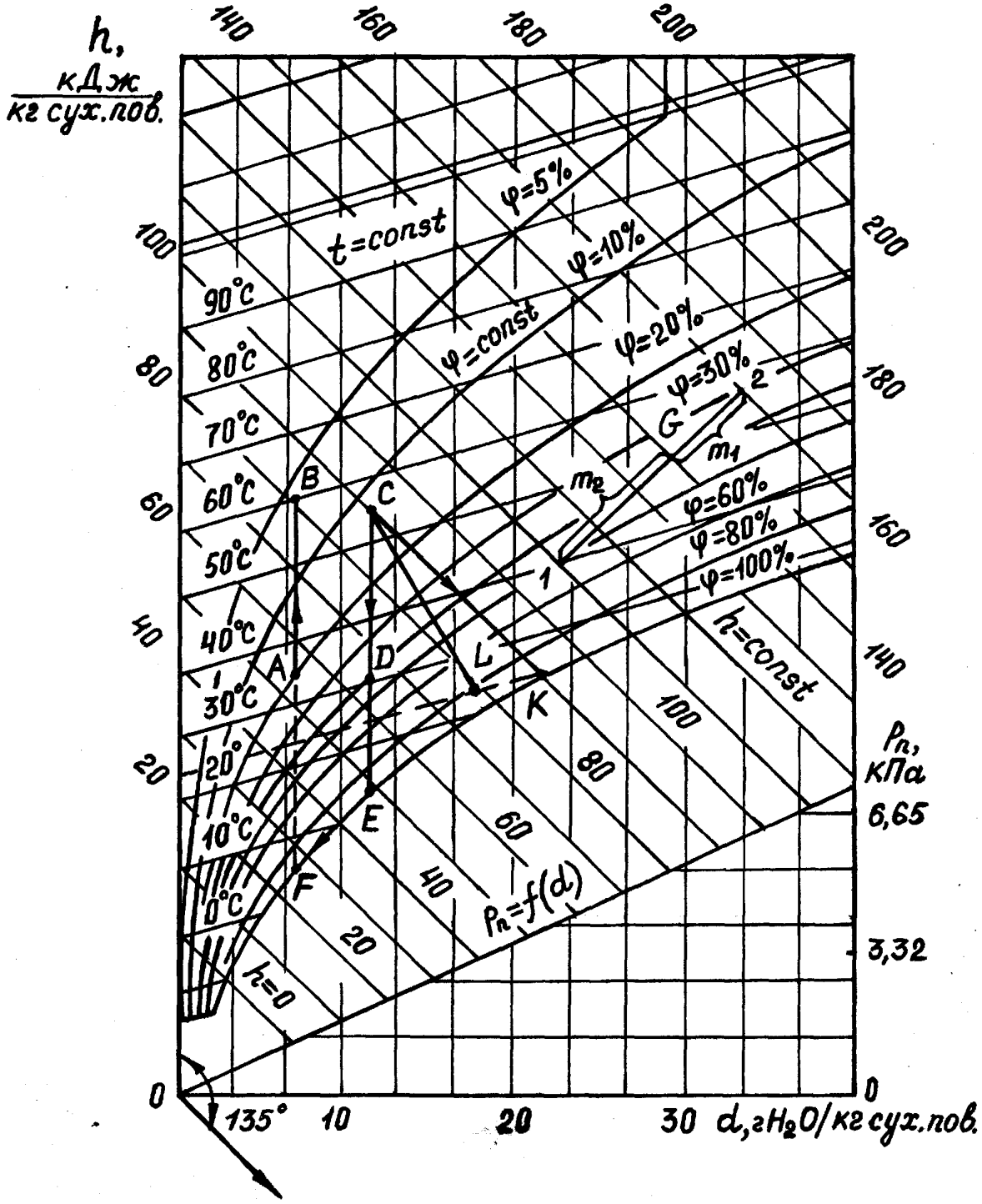
t, ^{0}C	1,2 МПа		1,4 МПа		1,6 Мпа		1,8 МПа		2,0 МПа		2,2 МПа		2,4 МПа	
	v, м^3/кг	h, кДж/кг	v, м^3/кг	h, кДж/кг	v, м^3/кг	H, кДж/кг	v, м^3/кг	h, кДж/кг	v, м^3/кг	h, кДж/кг	v, м^3/кг	h, кДж/кг	v, м^3/кг	h, кДж/кг
240	0,188	2912	0,160	2904	0,138	2895								
250	0,192	2935	0,164	2928	0,142	2919	0,125	2911	0,112	2903	0,100	2894	0,091	2885
280	0,205	3002	0,175	2996	0,152	2990	0,134	2983	0,120	2977	0,108	2970	0,098	2963
290	0,210	3024	0,179	3019	0,155	3013	0,137	3007	0,123	3001	0,111	2994	0,101	2968
300	0,214	3046	0,182	3041	0,159	3035	0,140	3030	0,126	3024	0,113	3018	0,103	3012
310							0,143	3052	0,128	3047	0,116	3042	0,106	3036
320							0,146	3075	0,131	3070	0,118	3065	0,108	3060
330							0,149	3097	0,133	3092	0,121	3088	0,110	3083
340							0,152	3119	0,136	3115	0,123	3110	0,112	3006
350							0,155	3141	0,137	3137	0,126	3133	0,115	3129
360							0,157	3164	0,141	3160	0,128	3156	0,117	3152
380							0,163	3208	0,146	3204	0,133	3200	0,121	3197
390							0,166	3230	0,149	3226	0,135	3223	0,123	3219
400							0,168	3251	0,151	3248	0,137	3245	0,125	3242

t, ^{0}C	3,0 МПа		3,2 МПА		3,4 Мпа		4,0 МПА		4, 2 МПа		4,4 МПа	
	v, м^3/кг	h, кДж/кг	v, м^3/кг	h, кДж/кг	v, м^3/кг	H, кДж/кг	v, м^3/кг	h, кДж/кг	v, м^3/кг	h, кДж/кг	v, м^3/кг	h, кДж/кг
280	0,0772	2942	0,0718	2934	0,0670	2972						
300	0,0812	2994	0,0756	2986	0,0707	2982	0,0589	2962	0,0557	2955	0,0527	2946
310	0,0831	3019	0,0775	3014	0,0725	3008	0,0605	2990	0,0572	2983	0,0542	2977
320	0,0850	3044	0,0793	3033	0,0610	3016	0,0587	3010	0,0557	3010	0,0557	3005
330	0,0869	3068	0,0810	3063	0,0759	3058	0,0635	3042	0,0601	3037	0,0571	3032
340	0,0887	3092	0,0828	3087	0,0776	3083	0,0650	3068	0,0616	3063	0,0585	3058
350	0,0905	3116	0,0845	3111	0,0792	3107	0,0665	3093	0,0630	3088	0,0597	3084
360	0,0923	3139	0,0862	3135	0,0808	3131	0,0679	3118	0,0644	3114	0,0612	3109
370	0,0941	3163	0,0879	3159	0,0824	3155	0,0693	3143	0,0657	3139	0,0625	3134

380	0,0959	3186	0,0896	3182	0,0840	3178	0,0707	3167	0,0671	3163	0,0638	3159
390	0,0976	3209	0,0912	3205	0,0856	3202	0,0720	3191	0,0684	3187	0,0651	3184
400	0,0993	3232	0,0929	3228	0,0871	3225	0,0734	3215	0,0699	3211	0,0663	3208
420	0,1030	3277	0,0961	3274	0,0902	3271	0,0761	3261	0,0722	3258	0,0688	3255
440	0,1060	3329	0,0993	3319	0,0932	3316	0,0787	3308	0,0748	3305	0,0712	3302
460							0,0813	3354	0,0733	3351	0,0736	3348



hs-діаграма водяної пари



hd - діаграма вологого повітря

Список літератури

Основна

1. Константінов С.М. Теоретичні основи теплотехніки. К.: Золоті ворота, 2012. 592 с.
2. Теплотехніка : підручник / Б. Х. Драганов, О. С. Бессараб, А. А. Долінський, В. О. Лазоренко, А. В. Міщенко, О. В. Шеліманова ; за ред. Б. Х. Драганова. 2-е вид., перероб. і доп. Київ : Фірма «ІНКОС», 2005. 400 с.
3. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. К: Техніка, 2006. 320 с.
4. Чепурний М. М., Ткаченко С. Й. Основи технічної термодинаміки: підручник. Вінниця: Поділля, 2004. 352 с.
5. Пеньков В.І. Технічна термодинаміка: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2010. 209 с.
6. Шестаков В. Л. Термодинаміка: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2009. 150 с.
7. Герасимов Г.Г. Теоретичні основи теплотехніки: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2011. 382 с.
8. Приходько М. А., Герасимов Г. Г. Термодинаміка та теплопередача: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2008. 250 с.
9. Константінов М. М. Теплообмін: підручник. Київ: ВПІ ВМК «Політехніка»: Інрес, 2005. 304 с.
10. Обертюх Р. Р. Теоретичні основи теплотехніки: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ. 2010. 165 с.
11. Миронов О. С., Бража М. Р., Бойко В. Б., Золотовська О. В. Теплотехніка: основи термодинаміки, теорія теплообміну, використання тепла в сільському господарстві. Дніпропетровськ: ЕНЕМ, 2011. 424 с.
12. Василенко С. В., Українець А. І., Олішевський В. В. Основи тепломасообміну: підручник. НУХТ.2004. 205с.
13. Константінов М.С. Теплообмін: підручник.К.: ВПІ ВПК “Політехніка”: Інрес, 2005. 304с.
14. В.А. Ковальчук, Т.С. Мацнєва. Теплопостачання: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2013. 300 с.
15. Маляренко В.А. Енергетичні установки. Загальний курс: навч. посіб. 2-ге видання Х: Видавництво “САГА”, 2008. 320 с.
16. Обертюх Р. Р. Теплопередача: навч. посіб. Вінниця: ВДТУ, 1999. 98 с.

Додаткова

17. Константінов С.М. Збірник задач з технічної термодинаміки та теплообміну. Луцьк: Освіта України, 2009. 544 с.