

Міністерство освіти і науки України

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет автоматики та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Технічна термодинаміка та тепломасообмін

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми „Енергетичний менеджмент” і освітнього рівня бакалавр

Кропивницький, 2018

Міністерство освіти і науки України

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет автоматики та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Технічна термодинаміка та тепломасообмін

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми „Енергетичний менеджмент” і освітнього рівня бакалавр

“Ухвалено”
на засіданні кафедри
“Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”
Протокол №2, від “12” 09. 2018р.

Кропивницький, 2018

Методичні вказівки для виконання лабораторних робіт з курсу „Технічна термодинаміка та тепломасообмін”: Лабораторний практикум та методичні вказівки до самостійних робіт для студентів спеціальності 141 освітньо-професійної програми “Енергетичний менеджмент” / Укл. Клименко В.В., Кравченко В.І.. – Кропивницький: ЦНТУ, 2018, 78 с. - укр.мовою.

Укладачі: д.т.н., професор Клименко В.В., к.т.н. , доцент Кравченко В.І.,

Рецензент: доктор технічних наук, професор Пашинський В.А.

Лабораторні роботи

Загальні положення

Лабораторні роботи з курсу „Технічна термодинаміка та тепломасообмін” виконуються паралельно з читання лекцій. Перед виконанням лабораторної роботи кожен студент повинен вивчити теоретичний матеріал за конспектом лекції, рекомендованою літературою і методичними вказівками, знати мету роботи, суть процесів, що вивчаються, порядок проведення роботи.

Кожен студент допускається до виконання лабораторних робіт тільки після ознайомлення з інструкцією з техніки безпеки. Реєстрація інструктажу фіксується у спеціальному журналі.

Для виконання кожної лабораторної роботи всі студенти повинні мати оформлені теоретичні положення і підготовлені для оформлення протоколи випробувань і розрахунків. До виконання лабораторної роботи допускаються студенти після перевірки викладачем теоретичних знань і порядку виконання роботи.

Звіти з лабораторних робіт оформлюються на окремих аркушах. Сторінки звіту нумеруються у такому порядку. Першою сторінкою вважається титульний лист, на якому номер не ставиться. Наступний аркуш повинен мати номер 2 і т.д. Номер аркушу ставиться у правому верхньому кутку без крапки, дефісів або інших знаків. На титульному аркуші зверху вказується міністерство, університет, кафедра. Посередині титульного аркуша приводиться назва звіту: лабораторна робота №__ з дисципліни „Технічна термодинаміка”; нижче вказується прізвище, ініціали і номер групи студента, а також вчене звання, прізвище та ініціали викладача. Внизу титульного аркушу вказується місто і рік, наприклад: „Кропивницький, 2018 р.”.

У звіті необхідно вказати назву лабораторної роботи, її мету, привести схему лабораторної установки, теоретичні відомості, протокол випробувань, результати розрахунків та самостійні висновки.

Лабораторна робота повинна бути захищена не пізніше наступного заняття.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ ВИМІРЮВАНЬ ТА АНАЛІТИЧНА ОБРОБКА ЇХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Мета роботи: вивчення методики обробки результатів дослідів для оцінки достовірних результатів.

1.1. Теоретичні відомості

Вимірювання є основою складовою будь-якого дослідів. Від ретельності вимірювань і наступних розрахунків залежать результати дослідів. Тому кожен дослідник повинен знати закономірності вимірювальних процесів: уміти правильно виміряти величини, які вивчаються; оцінити похибку при вимірюваннях; правильно, з потрібною точністю розрахувати значення величин та їх мінімальну кількість; визначити найкращі умови вимірювань, при яких помилки будуть найменшими, і здійснити загальний аналіз результатів вимірювань.

Вимірювання – це процес знаходження будь-якої фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів, це пізнавальний процес порівняння величини будь-чого з відомою величиною, яка прийнята за одиницю (еталон).

Мета вимірювання полягає у визначенні дійсного значення вимірювальної величини. Дійсне значення вимірювальної величини – це значення, яке ідеально відображає властивості даного об'єкту як у кількісному, так і у якісному відношенні. Воно не залежить від засобів пізнання і є тією абсолютною істиною, яку прагнуть виразити у вигляді числового значення. Результат вимірювання навпаки, є продукт пізнання і залежить від його засобів: методу вимірювання, технічного оснащення експерименту, суб'єктивних особливостей людини, яка виконує вимірювання.

Результати вимірювань оцінюють різними показниками. *Похибка вимірювання* – це алгебраїчна різниця між дійсним значенням вимірювальної величини x_g і одержаним при вимірюванні x_i : $\varepsilon = x_g - x_i$. Вимірювання x_g – це таке значення вимірювальної величини, яке точніше, ніж те що одержується при вимірюванні. Воно знаходиться експериментально і настільки наближається до дійсного, що для даної мети воно може бути виконане замість нього (наприклад: при зважуванні - гиря). З деяким припущенням x_g можна вважати дійсним або точним значенням величини.

Значення ε називають *абсолютною помилкою вимірювання*. *Відносна помилка* вимірювання (у %)

$$\delta = \pm (\varepsilon / x_g) 100. \quad (1.1)$$

Точність вимірювання – це ступінь наближення вимірювання до дійсного значення величини.

Достовірність вимірювання показує ступінь довіри до результатів вимірювання, тобто вірогідність відхилень вимірювань від дійсних значень.

Щоб підвищити точність і достовірність вимірювань, необхідно зменшити помилки. Помилки при вимірюваннях виникають внаслідок низки причин: недосконалості методів і засобів вимірювань, недостатньо ретельного проведення досліду, впливу різних зовнішніх факторів у процесі досліду, суб'єктивних особливостей дослідника та ін. Ці причини є результатом дії багатьох чинників.

Помилки вимірювань в залежності від їх характеру поділяють на систематичні та випадкові.

Систематичними називають постійні, що з'являються при повторних вимірюваннях помилки, які завжди одностороннє впливають на результати вимірювань, тільки збільшуючи або тільки зменшуючи їх на одне і те ж значення. Джерелами таких помилок є самі вимірювальні прилади і похибки методики вимірювання. Помилки, що викликані неправильною настройкою або несправністю приладу, можна усунути після ретельної його перевірки. Помилки, що пов'язані із класом точності приладу, а також помилки методики вимірювання враховують відповідними поправками в результатах вимірювань.

Випадковими називають помилки досліду, що приймають при повторних вимірюваннях різні за величиною і знаку значення. Вони можуть виникати внаслідок самих різних причин: вимірювання напруги у мережі (при електричних вимірюваннях), вимірювання температури у процесі досліду, русі повітря у приміщенні лабораторії, поганого освітлення шкали приладу та ін.

Різновидом випадкових похибок є *грубі похибки*, які суттєво перевищують систематичні або випадкові похибки. Грубі похибки викликані, як слід, помилками дослідника. Їх легко визначити. У розрахунку ці похибки не приймаються і при розрахунку x_g їх вилучають. Таким чином, можна записати

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \quad (1.2)$$

де ε_1 , ε_2 – систематичні і випадкові похибки вимірювань.

У процесі досліду важко відділити систематичні похибки від випадкових. Однак при ретельному і багатократному досліді все ж можна вилучити систематичні похибки. Основна задача вимірювань полягає у тому, щоб одержати по можливості результати вимірювань з меншими похибками.

Найбільш достовірним значенням величини, яка вимірюється, є середнє арифметичне значення n окремих вимірювань:

$$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n}. \quad (1.3)$$

Абсолютною помилкою вимірювання називається алгебраїчна різниця між значенням даного вимірювання і середньоарифметичним значенням величини, яка вимірюється, тобто:

$$\Delta a_i = a_i - \bar{a}. \quad (1.4)$$

Абсолютні помилки характеризують точність окремих вимірювань. Результати ж багатьох вимірювань однієї і тієї ж величини, тобто точність середньоарифметичного значення оцінюється середньою абсолютною помилкою:

$$\Delta \bar{a} = \pm \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta a_i|}{n}. \quad (1.5)$$

Розмірність $\Delta \bar{a}$ така ж, як у величини, для якої вона розрахована.

Таким чином, кінцевий результат вимірювання величини a з урахуванням помилок вимірювань буде мати вид:

$$a = \bar{a} \pm \Delta \bar{a}. \quad (1.6)$$

Відносною помилкою вимірювання називається відношення абсолютної помилки до самої величини, яка вимірюється, що виражена у процентах, тобто:

$$\delta a_i = \frac{\Delta a_i}{a} 100\% . \quad (1.7)$$

Звичайно знаходять тільки середню відносну помилку, яка визначається як відношення середньої абсолютної помилки вимірюваної величини до її середньоарифметичного значення:

$$\delta \bar{a} = \frac{\Delta \bar{a}}{\bar{a}} 100\% . \quad (1.8)$$

1.2. Метрологічні характеристики засобів вимірювання

Невід'ємною частиною експериментальних досліджень є засоби вимірювання, тобто сукупність технічних засобів, які дають необхідну інформацію для експерименту.

Точність вимірювання визначається точністю вимірювального приладу, похибками окремих перетворювачів і ліній зв'язку, які входять у вимірювальну систему, особливостями взаємодії елементів вимірювальної системи з середовищем, у якому здійснюються вимірювання. При оцінці якості вимірювальної системи необхідно розглядати принципи і методи вимірювання, аналізувати умови використання кожного вимірювального приладу, перетворювача, допоміжних пристроїв і каналів зв'язку з точки зору можливості викривлення результатів вимірювання.

Серед великої кількості цих засобів можна виділити такі основні групи приладів для вимірювання показників: фізичних, механічних, хімічних властивостей, а також структури матеріалу та виробу.

До засобів вимірювання відносять вимірювальний інструмент, вимірювальні прилади та установки.

Зразкові засоби є еталонами. Вони призначені для перевірки технічних, тобто робочих, засобів. Зразкові засоби не обов'язково повинні бути точніше робочих, але вони повинні мати велику стабільність та надійність у відтворенні. Зразкові засоби не застосовують для робочих вимірювань. З метою підвищити точність та чутливість вимірювань, а також розширити діапазон вимірювань додатково використовують вимірювальні перетворювачі.

Вимірювальним приладом називають засіб вимірювання, що призначений для одержання певної інформації про величину, яка вивчається, у зручній для дослідника формі. У цих приладах величина, що вимірюється, перетворюється у показання або сигнал. Вони складаються з двох основних вузлів: той, що сприймає сигнал (датчик) та який перетворює його у показання (підсилювач).

Прилади класифікують за різними ознаками. За способом відліку значення величини, яка вимірюється, їх поділяють на ті що показують та реєструють.

Найбільшу розповсюдженість одержали прилади, що показують, обладнання відліку яких складаються із шкали та показчика. Ці прилади дають показання без будь-яких додаткових операцій дослідника. Однак вони мають великі похибки, ніж цифрові. Більш зручні та перспективні прилади цифрові, що показують (механічні, електронні). Механізм відліку фіксує величину, яка вимірюється, у вигляді цифр. Вони дають меншу похибку.

Прилади, що реєструють, бувають самописними і друкованими. Самописні прилади (термографи, осцилографи) видають графік вимірювань. Друковані прилади видають вимірювання у вигляді цифр на стрічці. Прилади також класифікують за точністю вимірювань, стабільністю показання, чутливістю, межами вимірювань та ін.

Вимірювальна установка (стенд) є система, що складається з основних та допоміжних засобів вимірювання, які призначені для вимірювання одної складної або кількох параметрів.

Установка включає у себе різні прилади і перетворювачі. Перетворювачі призначені для одно - або багатоступінчастого перетворення сигналу до такого рівня, щоб його можна було зафіксувати вимірювальним механізмом. Перетворювачі, які збільшують у кілька разів на виході величину без зміни її фізичної сутності, називають масштабними перетворювачами (трансформатори, електронні посилювачі та ін.). Вони одержали найбільше розповсюдження. Існують також перетворювачі, які вхідний сигнал можуть перетворювати, змінюючи його фізичну сутність. Так, електромеханічний перетворювач змінює електричний сигнал (на вході) на механічний (на виході). Один прилад може мати кілька перетворювачів, що змінюють на виході вимірювальну величину у різних діапазонах. У кожному випадку при вимірюванні певної величини за допомогою перетворювача вибирають необхідний діапазон вимірювань.

Вимірювальні установки можуть виробляти також сигнали, зручні не тільки для зняття спостережень, але й для автоматичної обробки результатів вимірювань.

Вихідний сигнал вимірювальних приладів фіксується рахунковими пристроями, які бувають шкальними, цифровими і тими, що реєструють. Шкала є важливою частиною приладу. Відстань у міліметрах між двома суміжними відмітками на шкалі називають довжиною поділу шкали. Різниця між значеннями вимірювальної величини, що відповідає початку і кінцю шкали, називають діапазоном показань приладу.

Вимірювальні прилади характеризуються похибкою і точністю, стабільністю вимірювань і чутливістю.

Похибки вимірювальних приладів поділяють на основні та додаткові. Основною вважається похибка, яку дає прилад при нормальних умовах експлуатації. Додатковими називають похибки, що виникають через вплив несприятливих умов на роботу приладу (температури, вологості навколишнього середовища, вібрації і т.і.), неправильну установку приладу і недосконалі методи вимірювань.

Для всіх вимірювальних приладів відповідними стандартами і технічними умовами встановлені допустимі основні похибки, що виражаються у абсолютних або відносних значеннях.

Похибки приладів. Під абсолютною похибкою вимірювальних приладів розуміють:

$$b = \pm (x_s - x_d), \quad (1.9)$$

де x_s – показання приладу (номінальне значення вимірювальної величини); x_d – дійсне значення вимірюваної величини більш точним методом.

Похибка приладу – одна з найважливіших його характеристик. Вона виникає внаслідок низки причин: недоброякісних матеріалів, комплектуючих виробів, що застосовуються для виготовлення приладів; поганої якості виготовлення приладів; незадовільної експлуатації його та ін. Суттєвий вплив чинить градування шкали та періодична перевірка приладів.

Крім цих систематичних похибок, виникають випадкові, що обумовлені сполученням різних чинників – помилками відліку, паралаксом, варіацією і т.д. Таким чином, необхідно розглядати не будь-які окремі, а сумарні похибки приладів.

Часто для оцінки похибки приладів застосовують відносну похибку (y %) :

$$b_{\text{від}} = \pm ((x_s - x_d) / x_d) \cdot 100 \quad (1.10)$$

Інколи застосовують поняття приведеної похибки

$$b_{\text{пр}} = \pm ((x_s - x_d) / x_{\text{пр}}) \quad (1.11)$$

де $x_{\text{пр}}$ – будь-яке значення шкали вимірювального пристрою (діапазон вимірювань), довжини шкали та ін.

Приведені допустимі основні похибки теплотехнічних вимірювальних приладів в залежності від їх призначення і якості мають наступні значення: для технічних приладів $\pm(1,0 \dots 2,5)\%$ і вище; для контрольних приладів $\pm(0,6 \dots 1,0)\%$; для лабораторних, зразкових і еталонних приладів не вище $\pm 0,6 \%$.

Сумарні похибки, встановлені при певних умовах ($t_s = 20^\circ\text{C}$, вологість повітря 80%, $p = 760$ мм рт. ст.), називають *основними похибками* приладу.

Діапазоном вимірювань називають ту частину діапазону показань приладу, для якої встановлені похибки приладу. Якщо відомі похибки приладу, то діапазони вимірювань і показань приладу співпадають.

Діапазон вимірювань є важливою характеристикою приладу. Якщо шкала вимірювань змінюється від 0 до N , то у характеристиці на прилад діапазон указують у межах 0 – N . Низка приладів з нижньою межею вимірювання 0 має велику похибку в інтервалі 0 – 25 % від верхньої межі вимірювань, тобто чверть довжини шкали (початок) може давати похибку, що перевищує b .

Прилади не можна перевантажувати, тобто верхню межу вимірювань не потрібно перевищувати навантаженням.

Різниця між максимальним і мінімальним показанням приладу називають розмахом. Якщо ця величина непостійна, тобто якщо при зворотному ході є збільшення або зменшення ходу, то цю різницю називають *варіацією показань* ω . ω – це найпростіша характеристика похибки приладу. Іншою характеристикою приладу є його чутливість, тобто здатність пристрою, що відлічує, реагувати на зміни величини, яка вимірюється. Під порогом чутливості приладу розуміють найменше значення вимірюваної величини, що викликає зміну показання приладу, яке можна зафіксувати.

Точність приладу – основна його характеристика. Вона характеризується сумарною похибкою.

Засоби вимірювання поділяються на класи точності в залежності від допустимих похибок. Способи позначення класів точності приладів різні.

Клас точності приладу (1-й – найвищий, 4-й – найнижчий) означає допустиму, сумарну, відносну похибку від верхньої межі вимірювань. Так, якщо клас приладу дорівнює 1, тоді допустима відносна похибка дорівнює $\pm 1\%$. Для приладу з верхньою межею вимірювання 3 г/см^3 допустима похибка не повинна перевищувати $0,03 \text{ г/см}^3$ всієї робочої шкали. Якщо ж межа дорівнює ± 300 , або 3000 г/см^3 , допустима похибка відповідно дорівнює ± 3 та $\pm 30 \text{ г/см}^3$.

Стабільність або відтворення приладу – це властивість відлічувального пристрою забезпечувати сталість показників однієї і тієї ж величини. В результаті старіння матеріалів з часом порушується стабільність показників приладів.

На всі вимірювальні прилади у тій або іншій мірі діє магнітне поле землі. Тому низка електровимірювальних приладів повинна бути захищена від дії магнітного поля, а також електростатичних явищ. У спеціальній метрологічній літературі розроблені схеми захисту I (більш високої) і II категорій.

Перевірка засобів вимірювань передбачає визначення і по можливості зменшення похибок приладів. Визначення похибок дозволяє встановити, чи відповідає даний прилад регламентованій степені точності і чи може він бути застосований для даних вимірювань.

При перевірці засобів вимірювань, якщо нема потреби вносити поправки у похибки, визначають і встановлюють, чи не виходять вони за межі допустимих значень. Перевірку засобів вимірювань здійснюють на різних рівнях: від спеціальних державних організацій до низових ланок, тобто безпосередньо в організаціях, що проводять вимірювання. Державні метрологічні інститути і лабораторії за наглядом за стандартами та вимірювальною технікою здійснюють державний контроль за забезпеченням у країні єдиних мір.

Вимірювальні прилади і установки різних організацій підлягають обов'язковій державній перевірці один раз на 1-2 роки.

Під *регулюванням* приладу розуміють операції, що направлені на зниження систематичний помилок до величини, яка менша допустимої похибки. Вимірювальні прилади забезпечуються двома регульованими вузлами для регулювання нуля і чутливості. Регулювання нуля призначено для усунення систематичних помилок у діапазоні потрібної межі вимірювань.

Під *градуванням* розуміють нанесення міток на шкалу відлічувального пристрою по заздалегідь відомій виміряній величині.

Найбільш розповсюдженим способом перевірки приладів і оцінки його експлуатаційних характеристик є спосіб порівняння. Суть його зводиться до зіставлення приладу, який перевіряється, і зразкового. Одна й та ж вимірювальна величина оцінюється приладом, що перевіряється і зразковим. По відлікам судять про похибки, які вносять у прилад, який перевіряється.

1.3. Математико-статистична обробка експериментальних даних

Об'єктами дослідження при виконанні лабораторних робіт і учбових та дослідних робіт є теплотехнічні пристрої (теплообмінники, промислові печі, котли і т.і.), які використовують різні види джерел теплоти. Метою досліджень є визначення оптимальних умов використання енергії для забезпечення параметрів технологічних процесів.

Дані, які одержуються навіть на одній установці при багаторазових вимірюваннях під час ретельного додержання всіх умов можуть мати деякі розбіжності (похибки). Відмінності одержаних величин викликані неоднорідністю матеріалу, що використовується (наприклад, при визначенні вологості або зольності палива наважки не можуть мати абсолютно однаковий склад) та недосконалістю підготовки і аналізу зразків.

Як вказувалося вище, одні з цих розбіжностей викликають систематичні похибки, інші – випадкові. Систематичні розбіжності виявляються і вилучаються, а випадкові повністю усунути неможливо.

Тому при виконанні лабораторних та дослідних робіт необхідно оцінювати точність результатів розрахунків. Для цього здійснюють математико-статистичну обробку результатів вимірювань у наступному порядку:

1. Результати кожних вимірювань (x) записують у таблицю.
2. Розраховують середнє значення (\bar{x}) з n вимірювань:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1.12)$$

3. Знаходять похибку окремих вимірювань:

$$\Delta x = \bar{x} - x_i. \quad (1.13)$$

4. Розраховують квадрати похибок окремих вимірювань:

$$(\Delta x_i)^2 = (\bar{x} - x_i)^2. \quad (1.14)$$

5. При наявності одного або двох вимірювань, які різко відрізняються від інших, перевірити, чи не є вони грубими похибками. Для цього обчислити середнє квадратичне відхилення окремого вимірювання:

$$S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (1.15)$$

і відносне відхилення для i -го визначення:

$$\gamma = \frac{x_i - \bar{x}}{S_x \sqrt{\frac{n-1}{n}}}. \quad (1.16)$$

У випадку, коли обчислювальне значення γ для будь-якого визначення не перевищує за абсолютною величиною табличне значення для вибраного рівня значимості (найчастіше 0,05) і числа ступенів свободи $f = n - 2$, то приймається гіпотеза про однозначність результатів вимірювань, у протилежному випадку – результат може бути віднесений до похибок і виключено з подальших розрахунків.

Таблиця 1.1. Значення γ_I для рівня значимості 0,05

Число ступенів свободи	1	2	3	4	5	6	7
γ_I	1,412	1,689	1,869	1,996	2,093	2,172	2,237

6. Визначається середня квадратична похибка результатів серії вимірювань:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n(n-1)}}. \quad (1.17)$$

7. Задається значення надійності α (у більшості випадків $\alpha = 0,95$, що є достатньою характеристикою точності вимірювання).

8. За таблицею визначається коефіцієнт Ст'юдента $t_{\alpha(n)}$ для заданої надійності α і числа вибраних вимірювань.

9. Знаходять межі довірчого інтервалу (похибка результатів вимірювань):

$$\Delta x_{\text{роз}} = t_{\alpha(n)} \cdot S_x; \quad (1.18)$$

значення $t_{\alpha(n)}$ приймають з таблиці значень критерію Ст'юдента за рівнем значимості 0,05 $t_{\alpha(n)}$:

Таблиця 1.2

Число степені свободи	1	2	3	4	5	6	7
$t_{\alpha(n)}$	12,71	4,3	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36

10. У випадку, коли значення похибки вимірювань $\Delta x_{роз}$ виявиться порівняною із значенням похибки приладу, то межі довірчого інтервалу визначається величиною:

$$\Delta x = \sqrt{t_{\alpha(n)} S_x^2 + \left(\frac{k_{\alpha}}{3}\right)^2 \delta}, \quad (1.19)$$

де δ – похибка приладу; $k_{\alpha} = t_{\alpha}$.

11. Записують остаточний результат у виді

$$x = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (1.20)$$

12. Знаходять відносну похибку результату серії вимірювань ε (%)

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} 100. \quad (1.21)$$

Розраховувати середню квадратичну похибку вимірювань, число яких менше чотирьох, недоцільно. У цьому випадку необхідно користуватися середньою арифметичною похибкою.

Завдання для самостійної роботи

Визначити похибку вимірювання таких значень:

- 0,465; 0,450; 0,465; 0,450; 0,435; 0,435; 0,465; 0,465; 0,450; 0,465
- 4,98; 4,92; 4,96; 4,89; 4,90; 4,96; 4,96; 4,91; 4,95; 4,92
- 735,66; 735,62; 735,70; 735,64; 735,60; 735,68; 735,62; 735,64; 735,66; 735,68
- 22,6; 22,8; 22,6; 22,4; 22,4; 22,6; 22,5; 22,7; 22,4; 22,3
- 80,2; 80,3; 80,4; 80,3; 80,5; 80,3; 80,5; 80,6; 80,4; 80,6
- 1,236; 1,242; 1,238; 1,236; 1,238; 1,232; 1,236; 1,240; 1,238; 1,234
- 0,56; 0,53; 0,49; 0,57; 0,48; 0,53; 0,58; 0,48; 0,56; 0,50
- 578; 564; 539; 604; 551; 468; 528; 592; 547; 492
- 7,63; 7,60; 7,64; 7,59; 7,62; 7,66; 7,63; 7,65; 7,62; 7,58
- 56,7; 54,9; 55,3; 57,8; 55,8; 54,7; 56,6; 58,1; 56,9; 57,2

Контрольні запитання:

- Що називають похибкою вимірювання?
- В наслідок чого виникають похибки вимірювання?
- Дайте дефініцію випадковим і систематичним похибкам.

4. Як визначається абсолютна та відносна помилка вимірювання?
5. Що відносять до засобів вимірювання?
6. Що означає клас точності приладу?
7. Як здійснюється обробка результатів вимірювань при відшукуванні одного значення параметра?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ СТАНУ

Мета роботи: вивчити термічні параметри стану, будову і принцип роботи приладів для вимірювання тиску і температури, одиниці тиску і методику перерахунку раніш застосованих одиниць у міжнародну систему одиниць вимірювання (СИ), основні правила установки приладів і вимірювання величин; вміти використовувати параметри стану в конкретних інженерних задачах (на прикладі вимірювання витрати газу).

2.1 Параметри стану

Термодинамічними параметрами, що характеризують стан робочого тіла є : питомий об'єм v , абсолютний тиск P і абсолютна температура T .

Питомий об'єм

Питомий об'єм - це відношення об'єму V до маси m :

$$v = V/m, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.1)$$

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

$$\rho = m/V, \text{ кг/м}^3. \quad (2.2)$$

Відповідно $\rho \cdot v = 1$

Абсолютний тиск

Абсолютним тиском називається сила P , яка припадає на одиницю площі f і діє по нормалі до її поверхні:

$$p = P/f. \quad (2.3)$$

Згідно молекулярно-кінетичної теорії тиск газу визначається рівнянням: $p = \frac{2}{3} n m c^2$,

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) тиск $P_{\text{над}}$, 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.

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

Абсолютний тиск може бути розрахований за формулами:

$$P_{\text{абс}} = B + P_{\text{над}}, \quad P_{\text{абс}} = B - P_{\text{вак}}. \quad (2.4)$$

У системі СІ за одиницю тиску приймають паскаль (Па), який дорівнює силі у ньютонах (Н), віднесений до одиниці площі у м², тобто 1 Па = 1 Н/м². Величина 1 Па для багатьох технічних розрахунків виявилась занадто малою і тому застосовують більші одиниці:

кілопаскаль (кПа = 10³ Па), мегапаскаль (1 МПа = 10⁶ Па).

До введення системи одиниць СІ широко розповсюдженими були такі одиниці тиску: технічна атмосфера (ат) 1 ат = 1 кг/см² = 1 кгс/см², рідше фізична атмосфера (атм), а також міліметри водяного стовпа (1 мм вод. ст. = 10 Па) і міліметри ртутного стовпа (1 мм рт. ст. = 133 Па).

Співвідношення між одиницями вимірювання тиску такі:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 735,6 \text{ мм рт. ст.} = 10 \text{ м вод. ст.} = 10^4 \text{ мм вод. ст.} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} = 0,0981 \text{ МПа.}$$

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

Іноді застосовують позасистемну одиницю – бар: 1 бар = 10⁵ Па.

Якщо тиск виміряно висотою стовпа рідини, то для визначення тиску можна скористатись формулою, Па:

$$P = \rho gh, \quad (2.5)$$

де ρ – густина рідини, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

h – висота стовпа рідини, м.

2.2 Прилади для вимірювання тиску

Для вимірювання невеликих тисків (до 0.1...0.15 МПа) застосовують рідинні манометри, в яких робочою рідиною служить, як правило, дистильована вода, ртуть або спирт. Тиск (надлишковий або вакуумний) урівноважується стовпом рідини висотою h . Відрахування тиску проводиться за шкалою згідно різниці рівнів рідини (рис.2.1).

При таких вимірюваннях треба враховувати залежність густини рідини від температури, залежність g від географічної широти, а також змінення, в залежності від температури, довжини шкали, за якою проводиться відрахування висоти стовпа рідини. Ці поправки становлять у сумі рідко більше 0,5 % від тиску, що вимірюється.

2.3 Правила встановлення та експлуатації

1. Прилад повинен знаходитись у вертикальному положенні.

2. Вплив температури може бути враховано для ртутних U-подібних манометрів за формулою, мм рт. ст.:

$$h_0 = h_t (1 - 0.00172t),$$

де h_0 – показання манометра, які приведені до нуля, °C;

h_t – показання манометра при температурі оточуючого середовища, °C.

Для вимірювання великих тисків застосовують манометри наступних типів: вантажно-поршневі, трубчасті (пружинні), мембранні та інші.

Для вимірювання невеликих тисків або їхнього перепаду використовуються диференційні манометри. Як диференційні можуть використовуватись U-подібні рідинні, трубчасті або мембранні манометри.

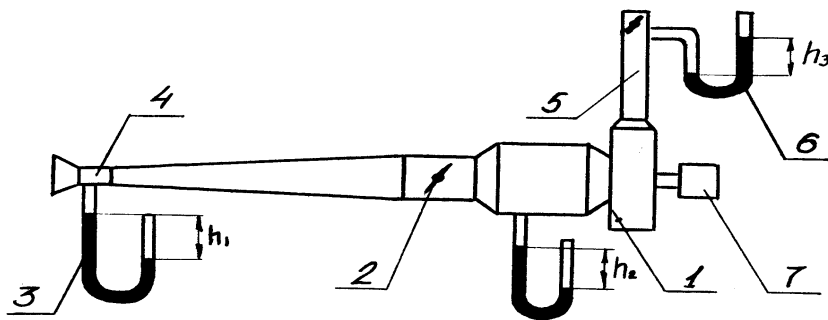
Більш докладно конструкції приладів для вимірювання тиску студенти вивчають у лабораторному практикумі з дисципліни "Гідравліка і гідропривід" або спеціальній літературі.

2.4 Правила встановлення та експлуатації трубчастих манометрів

1. При виборі шкали приладу необхідно враховувати, що максимальний тиск, який вимірюється приладом, не повинен перевищувати 2/3 шкали при спокійному навантаженні і 1/2 шкали при навантаженні, що коливається. Мінімальний тиск, який вимірюється в обох випадках, повинен бути не менш 1/3 шкали.
2. Прилади треба встановлювати віддалік від джерела тепла. Максимальна температура оточуючого середовища повинна бути не вище 60 °C і не нижче +10 °C.
3. При вимірюванні тиску агресивних середовищ прилади повинні підключатися через сифонну трубку, яка заповнена конденсатом (дистильованою водою) або будь-якою іншою нейтральною рідиною.

2.5 Лабораторна установка

Лабораторна установка (рис.2.1) складається з вентилятора 1, привід якого здійснюється від електродвигуна 7. На всмоктуючому боці встановлені витратомір 4 і дросельна заслінка 2, на нагнітаючому боці - повітропровід 5. Розрідження і надлишковий тиск вимірюються



манометрами 3, 6.
тиску

Рис.2.1. Принципова схема лабораторної установки для вимірювання тиску

Порядок проведення роботи

1. Включити електродвигун, дочекатись, поки вентилятор буде обертатись із сталим числом обертів.
2. За допомогою заслінки 2 встановити необхідне розрідження і записати показання манометрів 3 і 6. За допомогою барометра виміряти атмосферний тиск.
3. Виключити електродвигун.
4. Перевести в систему СІ показання виміряних величин.
5. Обчислити абсолютний тиск. Результати вимірювань і розрахунків внести в протокол випробувань.

Протокол випробувань

Параметр	мм вод. ст.	мм рт. ст.	Па	ат	КПа	бар
Атмосф. тиск, B						
Надлишк. тиск, $P_{над}$						
Розрідження, $P_{вак}$						
Абсол. тиск, $P_{абс(над)}$						
Абсол. тиск, $P_{абс(вак)}$						

2.6 Абсолютна температура

Тепловий стан робочого тіла характеризується температурою. Для ідеального газу згідно молекулярно-кінетичної теорії:

$$T = \frac{2}{3K} \frac{mc^2}{2}, \quad (2.6)$$

де T – абсолютна температура; K – константа Больцмана;

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

Практично кінетичну енергію виміряти неможливо, тому для вимірювання температури застосовують прилади, дія яких ґрунтується на використанні термометричних властивостей газів, рідин та твердих тіл. До цих приладів відносяться: термометри розширення, манометричні термометри, термометри опору, термоелектричні прилади і пірометри випромінювання (див. стенд приладів).

При вимірюванні абсолютної температури використовується термодинамічна температурна шкала, в якій для температури потрійної точки води встановлено значення 273,16 К. Одиницею температури за цією шкалою є 1 Кельвін (К).

Крім термодинамічної температурної шкали існує міжнародна практична температурна шкала. Температура в цьому випадку вимірюється в градусах Цельсія (°C). Температура потрійної точки води 273,16 К відповідає 0,01 °C.

При використанні міжнародної практичної температурної шкали абсолютна температура обчислюється за формулою:

$$TK = t^{\circ}C + 273,15^{\circ}. \quad (2.7)$$

2.7 Пристрої для вимірювання температури

(стенд приладів)

Пристрої, які призначені для вимірювання температури шляхом перетворення її в показання або у сигнал, який є відомою функцією температури, називаються термометрами (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Практичні межі застосування пристроїв для вимірювання температури

Термометрична властивість	Пристрій	Межі тривалого застосування град.С
------------------------------	----------	--

Теплове розширення	Рідинний скляний термометр	-190	600
Зміна електричного опору	Електричний термометр опору	-200	600
	Напівпровідниковий термометр опору (термістор, терморезистор)		
Зміна тиску	Манометричний термометр	-160	600
Термоелектричний ефект(термоЕРС)	Термоелектричний термометр опору (термопара)	-50	2500
Теплове випромінювання	Оптичний пірометр	700	6000

Термометри розширення

Дія цих термометрів заснована на різниці коефіцієнтів теплового розширення термометричної речовини та оболонки, в якій вона знаходиться. Рідинний термометр складається з скляного балону, капілярної трубки і шкали, нанесеної на скло, або на спеціальну пластину. Термометрична речовина заповнює балон і частково капілярну трубку. Вільний простір у капілярній трубці заповнюється інертним газом або може бути під вакуумом. Відлік проводиться за висотою рівня рідини в капілярі. Як термометричні речовини застосовуються хімічно очищені ртуть, спирт тощо.

Переваги рідинних термометрів: простота конструкції, досить висока точність.

Недоліки: погана видимість шкали, інерційність, неможливість автоматичного запису показань і передачі їх на відстань.

Термоелектричні термометри (термопари)

Ці пристрої знаходять широке застосування як у лабораторіях, так і на виробництві.

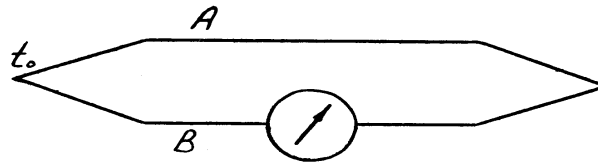


Рис 2.2. Термоелектричний ланцюг

Термопара (рис.2.2,2.3) складається з двох різнорідних провідників (термоелектродів), які утворюють спільний електричний ланцюг. Якщо температури спаїв неоднакові, то виникає термоелектрорушійна сила (термоЕРС), тим більша, чим більша різниця температур. За величиною термоЕРС судять про температуру спаїв. Результуюча термоЕРС в ланцюгу, складеному з двох різних провідників, однорідних за довжиною, дорівнює різниці потенціалів:

$$E_{AB}(t, t_0) = \lambda_{AB}(t) - \lambda_{AB}(t_0),$$

де $E_{AB}(t, t_0)$ – результуюча термоЕРС;

$\lambda_{AB}(t), \lambda_{AB}(t_0)$ – термоЕРС відповідно гарячого і холодного спаїв.

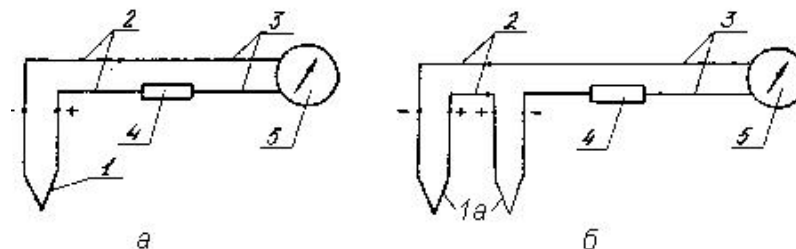


Рис 2.3. Схема вимірювання термоЕРС:

а – схема повного роз'єднання термоелектродів;

б – схема вимірювання термоЕРС з термостатуванням холодного спаю;

1 – термопара; 1а – диференціальна термопара; 2 – компенсаційні проводи; 3 – з'єднувальні проводи; 4 – електричний опір; 5 – мілівольтметр.

Якщо температуру холодного спаю підтримувати на сталому рівні, то $\lambda_{AB}(t_0) = \text{const} = c$. Тоді $E_{AB}(t, t_0) = \lambda_{AB}(t) = c$.

Для вимірювання термоЕРС в ланцюгу вмикається прилад одним з двох способів: роз'єднуються на одному з кінців термоелектроди (звичайно холодний спай), або розривається один з термоелектродів (рис. 2.3).

Таким чином, якщо виміряти термоЕРС в ланцюгу, можна робити висновок про різницю температур $t - t_0$ або, якщо одна з температур, наприклад t_0 , відома, то можна робити висновок про температуру t .

Залежність термоЕРС від температури відтворюється за допомогою графіка або табл. 2.2.

Для вимірювань температури застосовують термопари ТХА (хромель-алюмель) і ТХК (хромель-копель), градуйовані дані яких приведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Температура стандартних термопар

Термо пара	Температура, °C												
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
ТХА	4.1	8.13	12.81	16.4	20.65	24.91	29.15	33.32	37.37	41.32	45.16	48.87	52.43
ТХК	6.95	14.66	22.91	31.49	40.16	49.02	57.77	66.42					

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

Електричні термометри опору

Вимірювання температури за електричним опором тіл (здебільшого металевих) засноване на залежності їх електричного опору від температури. Чисті метали при нагріванні на 1 °C збільшують свій опір на 0,4...0,6% , а напівпровідники (оксиди металів) зменшують його на 1,6...3,6 % .

В промислових умовах опір термометрів вимірюється неврівноваженими мостами і автоматично зрівноваженими мостами.

Технічні термометри опору виготовляють здебільшого з платинового або мідного дроту. Платиновий термометр (рис.2.4) складається з слюдяної пластини 1, яка має зубчасті краї і на яку намотується платиновий дріт 2 діаметром 0,07 мм. Зовні розміщуються слюдяні пластини-ізолятори 3, скріплені між собою срібною стрічкою. Термометр підключається до приладу через срібні виводи 4 і вміщується у кожух з тонкостінної трубки та в захисний чохол.

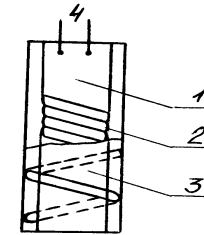


Рис 2.4. Термометр опору

Перевагою термометрів опору є достатньо висока точність вимірювання. При встановленні термометру опору у вимірюване середовище, його середина має знаходитись у центрі потоку. Опір з'єднувальних проводів повинен бути не більше 5 Ом.

2.8 Вимірювання витрати газу

Мета роботи – показати як використовуються параметри стану на прикладі зміни витрати газоподібного середовища швидкісним методом.

2.8.1. Загальні відомості

Під терміном "витрата газу" розуміють витрачену в масових або об'ємних одиницях кількість газу, який протікає через даний поперечний переріз трубопроводу площею f , m^2 зі швидкістю c , m/s .

Формули для обчислення:

$$\text{об'ємної витрати, } m^3/s: V = fc, \quad (2.8)$$

$$\text{масової витрати, } kg/s: M = \rho fc, \quad (2.9)$$

де ρ – густина газу в даній площині перерізу, kg/m^3 .

Для визначення витрати рідини або газу застосовують дросельний або швидкісний методи вимірювання.

Дросельний метод заснований на законі дроселювання і передбачає установку на прямій ділянці трубопроводу дросельного пристрою (діафрагми, сопло Вентурі), який утворює звуження перерізу. У звужуючому пристрої швидкість потоку збільшується, внаслідок чого згідно закону Бернуллі відбувається падіння тиску. З різниці тисків перед звужуючим пристроєм і за ним судять про витрату речовини.

Дросельний метод вимірювання витрати середовищ застосовують у тих випадках, коли за умовами виробництва потрібен безперервний контроль витрати.

При випробуваннях вентиляційних систем, проведенні досліджень в лабораторних умовах і т.п. застосування знаходить швидкісний метод вимірювання витрати, заснований на визначенні середньої швидкості потоку в даному перерізі трубопроводу.

Середню швидкість потоку можна визначити різними приладами: пневматичними або напірними трубками, анемометрами та ін.

В даній лабораторній роботі використовується методика вимірювання швидкості газу за допомогою пневмометричної трубки.

Газовий потік у трубопроводі характеризується статичним тиском $P_{ст}$, швидкісним (динамічним) $P_{шв}$ і повним P_n тисками, зв'язок між якими встановлюється рівнянням Бернуллі:

$$P_n = P_{ст} + P_{шв} \quad (2.10)$$

Швидкісний тиск (напір) визначається формулою, Па:

$$P_{шв} = \rho c^2 / 2 \quad (2.11)$$

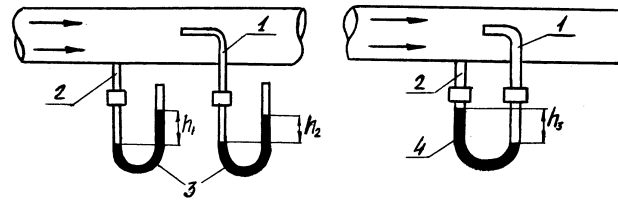
звідки швидкість потоку, m/s :

$$c = \sqrt{2P_{\text{шв}} / \rho}, \quad (2.12)$$

Таким чином, визначення швидкості потоку зводиться до вимірювання швидкісного тиску. З рівняння (2.10) маємо:

$$P_{\text{шв}} = P_n - P_{\text{ст}}$$

Повний тиск можна виміряти за допомогою відкритої трубки Піто 1, поставленої назустріч потоку, а статичний – за допомогою трубки 2, вставленої в отвір трубопроводу перпендикулярно до потоку (рис. 2.5а)



а) б)

Рис. 2.5. Схема вимірювання тисків у трубопроводі

а) 1 – трубка повного тиску; 2 – трубка статичного тиску; 3 – манометри; б) 4 – диференціальний манометр.

Якщо обидві трубки приєднати до протилежних кінців дифманометра, то різниця рівнів робочої рідини в ньому покаже значення швидкісного тиску.

В даній роботі для вимірювання швидкісного тиску використовується подвійна пневмометрична трубка МІОП (Московського інституту охорони праці) (рис. 2.6).

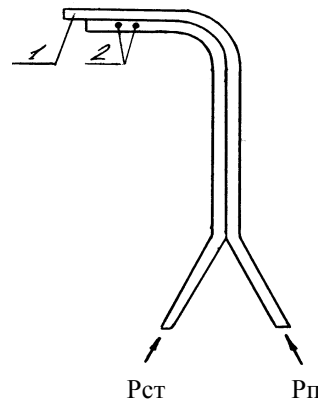


Рис. 2.6. Подвійна пневмометрична трубка МІОП

Приймачем повного тиску в ній є осьовий отвір 1, а приймачем статичного тиску – ряд радіальних отворів 2. Подвійна пневмометрична трубка дозволяє одразу вимірювати швидкісний тиск у будь-якій точці поперечного перерізу потоку. Якщо від'єднати від дифманометра приймач повного тиску, то можна виміряти статичний тиск у трубопроводі. Розміщуючи пневмометричну трубку в різних точках поперечного перерізу трубопроводу, можна знайти розподіл швидкостей в ньому. Швидкість

потоків і швидкісний тиск, як наслідок, в різних точках поперечного перерізу різні. Тому для обчислення середньої швидкості потоку треба знати середній динамічний тиск в даному перерізі, який визначається як середня квадратична величина, Па:

$$P_{\text{ср}} = \left[\frac{(\sqrt{P_{\text{ср}1}} + \sqrt{P_{\text{ср}2}} + \dots + \sqrt{P_{\text{ср}n}})^2}{n} \right], \quad (2.13)$$

де $P_{\text{ср}1}, \dots, P_{\text{ср}n}$ – значення динамічного тиску, що виміряні у різних точках перерізу трубопроводу; n – кількість вимірювань.

При вимірюванні швидкісного тиску необхідно визначити точки виміру. Для цього площу поперечного перерізу трубопроводу розбивають на m рівновеликих кілець (рис. 2.7). Вимірювання проводяться в двох взаємно перпендикулярних напрямках у центрі цих площин. Середні радіуси кілець визначають за формулою:

$$r_n = R \sqrt{\frac{2n-1}{2m}}, \quad (2.14)$$

де R – радіус трубопроводу, м;

n – порядковий номер точки заміру;

m – кількість рівновеликих площ.

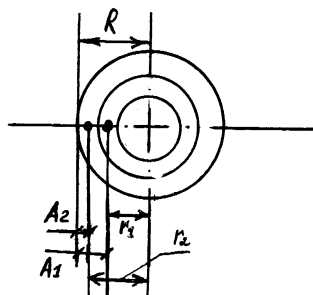


Рис. 2.7. Схема розміщення точок вимірів по перерізу трубопроводу

Для установки пневмометричної трубки необхідно визначити відстань A від стінки труби до точки виміру, м:

$$A_i = R_i - r_n, \quad (2.15)$$

При визначенні швидкості потоку повітря за формулою (2.12) необхідно знати густину повітря ρ , яка для приблизних розрахунків може бути прийнята $1,2 \text{ кг/м}^3$.

Для точних вимірювань витрати газу його густина повинна визначатися в залежності від параметрів газу в перерізі, де вимірюється витрата. Для цього використовується рівняння Менделєєва-Клапейрона, згідно з яким:

$$\rho = \frac{p}{RT}, \quad (2.16)$$

де R – газова стала, Дж/(кг К); p – абсолютний статичний тиск газу, який визначається за одною з формул (2.4), Па; T – абсолютна температура газу, К.

2.8.2 Порядок проведення роботи

В даній роботі витрата повітря вимірюється на вентиляційній установці (рис.2.1). На трубопроводі 5, розташованому на боці нагнітання є отвір, призначений для

встановлення напірної трубки.

Робота виконується в такій послідовності:

1. Перевірити підключення манометрів до напірної трубки.
2. Включити вентилятор.
3. За допомогою заслінки 2 установити задану витрату повітря.
4. При номінальному числі обертів виміряти статичний і динамічний тиск.
5. Виключити вентилятор.
6. За барометром виміряти атмосферний тиск, а за термометром – температуру зовнішнього повітря. Виміряти внутрішній діаметр трубопроводу.

Результати вимірювань і розрахунків занести у протокол випробувань.

Для визначення точок вимірів площа поперечного перерізу трубопроводу розбивається на два рівновеликих за площею кільця.

При вимірюванні витрати пневмометричними трубками слід додержуватись таких правил:

1. Трубка встановлюється в такій площі перерізу трубопроводу, де повітряний потік усталений. Для цього слід додержуватись вимоги, щоб до наконечника трубки і після нього були прямі ділянки довжиною не менш, як $4d$.
2. Трубка встановлюється наконечником назустріч потоку і паралельно йому. Відхилення від стінок трубопроводу не повинно перевищувати 7° .

Протокол випробувань і розрахунків

Параметр	Номер формули	Одиниця вимір.	Позначення	Результат
1	2	3	4	5

Діаметр трубопроводу

-

м

d

Площа поперечного пе-

рерізу

-

m^2

f

Кількість точок

вимірів

-

шт

n

Барометричний

Параметр	Номер формули	Одиниця вимір.	Позначення	Результат
1	2	3	4	5

Статичний тиск

-

мм вод.ст.

$P_{ув2}$

-

мм вод.ст.

$P_{ув3}$

-

мм вод.ст.

$P_{ст}$

-

Па

Температура атмосф.

повітря

-

$^\circ C$

t

Глибина занурення

трубки

2.14

мм

r_1

відносно центру

тиск

-

мм рт.ст.

B

-

Па

B

Швидкісний (динамічний)

тиск

-

мм вод.ст.

$P_{ув1}$

труби	-	мм	r_2
Глибина занурення трубки відносно стінки труби	2.15	мм	A_1
		мм	A_2
Середній швидкісний тиск	2.13	мм вод.ст	$P_{шв}$
	-	Па	
Абсолютний статичний тиск	2.4	Па	P
Абсолютна температура	2.7	К	T
Густина повітря	2.16	кг/м ³	ρ
Середня швидкість повітряного потоку	2.12	м/с	c
Витрата повітря секундна:			
об'ємна	2.8	м ³ /с	V
масова	2.9	кг/с	M
Витрата повітря годинна:			
об'ємна	-	м ³ /год	$V_{год}$
масова	-	кг/год	$M_{год}$

Контрольні запитання:

1. Які параметри стану Ви знаєте? Їхні одиниці.
2. Напишіть рівняння стану ідеального газу.
3. Які види тисків виникають у потоці газу і який зв'язок існує між ними?
4. В чому полягає суть швидкісного методу вимірювання витрати газу?
5. Як треба підключити манометр до пневмометричної трубки, щоб виміряти швидкісний і статичний тиск?
6. Як побудована пневмометрична трубка?
7. Що таке швидкісний тиск?
8. Як визначається витрата газу? Які величини необхідно для цього знати?
9. Як визначити газову постійну суміші газів?

Завдання для самостійної роботи

Завдання виконуються згідно індивідуальних варіантів, вибраних за останньою цифрою залікової книжки або згідно порядкового номера списку прізвищ студентів групи у журналі викладача.

Задача 2.1. Тиск у котлі за манометром складає $P_{атм}$ при показанні барометра B мм рт. ст. Визначити абсолютний тиск у котлі у МПа. Вихідні дані в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P , бар	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
B , мм рт ст	750	755	760	765	730	725	720	745	758	730	738	760	765	741	755

Задача 2.2. Розрідження у конденсаторі парової турбіни складає $P_{вак}$ при барометричному тиску B мм рт. ст. Визначити абсолютний тиск у конденсаторі в МПа.

Вихідні дані в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P , бар	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.5	0.45	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.55
B , мм рт ст	740	745	750	755	760	725	730	735	740	731	722	740	750	760	732

Задача 2.3. Маса газу у балоні складає M кг. Об'єм балона V м³. Визначити густину і питому силу ваги газу. Вихідні дані в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
M , кг	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
V , м ³	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.8	0.85	0.9	1.0

Задача 2.4. В резервуарі, об'єм якого V м³, знаходиться вуглекислий газ. Знайти масу газу і його вагу, якщо надлишковий тиск $P_{над}$, бар, температура t , °С, а $B = 730$ мм рт. ст. Вихідні дані в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
V , м ³	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.2	4.5	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2
P , бар	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
t , °С	60	70	80	90	100	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100

Задача 2.5. Знайти масу і силу ваги газу, об'ємний склад якого r_{O_2} і r_{CO_2} при надлишковому тиску P і $t = 120$ °С. Атмосферний тиск 728 мм рт. ст. Вихідні дані в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P , бар	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.3	3.5	3.8	4.0	4.2	4.5	4.3	4.5	4.8	5.0
r_{O_2}	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75
r_{CO_2}	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.75	0.65	0.55	0.45	0.35	0.25

Задача 2.6. Визначити швидкісний напір і повний тиск H_2 , що протікає по трубопроводу діаметром d , якщо манометр показує тиск P , при температурі t і атмосферному тиску $B = 730$ мм рт. ст. Масова витрата M . Вихідні дані в табл. 2.8.

Таблиця 2.8.

Параметр	Варіант																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	15	20	25	30	35	40	50	55	60	65	70	75	80	85	90	15	20	25	30	35	40	50	55	60	65
$P_{над}$, атм	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.5	2.5										
t , °С	15	18	20	22	25	28	30	32	35	38	40	42	45	48	50										
M , кг/с	0.001	0.012	0.013	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.026	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.08										

[1, с 11-27; 2, с 7-10; 3, с 8-12; 18-20]

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛІТРОПНОГО ПРОЦЕСУ

Мета роботи: визначити експериментально показник політропи і розрахувати теплоємність, роботу, кількість теплоти, зміну внутрішньої енергії, ентальпії і ентропії, проаналізувати одержані результати.

3.1. Загальні відомості

Політропними називають будь-які довільні термодинамічні процеси, які здійснюються при сталій теплоємності.

Рівняння політропного процесу, записане через P і v параметри, має вигляд:

$$Pv^n = const, \quad (3.1)$$

де n – показник політропи, який може приймати значення від $-\infty$ до $+\infty$, але для даного процесу він є величина стала.

Значення показника політропи у будь-якому процесі можна знайти, якщо прологарифмувати рівняння співвідношення параметрів:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(n-1)}{n}}, \quad (3.2)$$

тобто:

$$n = \frac{\ln \frac{P_2}{P_1}}{\ln \frac{V_1}{V_2}}. \quad (3.3)$$

Величина n також може бути визначена, якщо побудувати політропний процес у логарифмічних координатах (рис. 3.1.)

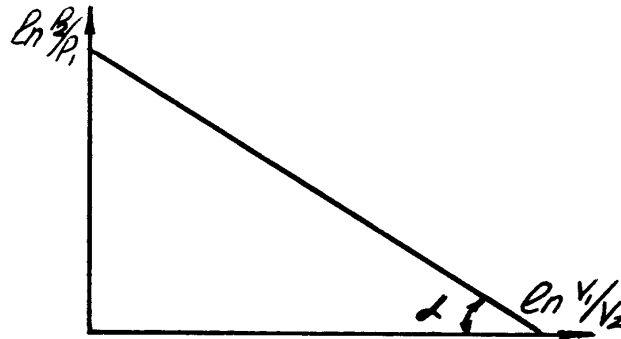


Рис. 3.1. Зображення політропного процесу у логарифмічних координатах.

Процес зображується прямою лінією, тангенс кута нахилу якого чисельно дорівнює показнику n .

Кількість тепла, яке підводиться до системи або відводиться від неї при політропному процесі, розраховується за рівнянням, кДж/кг

$$q = C_n (t_2 - t_1), \quad (3.4)$$

де C_n - теплоємність політропного процесу, кДж/(кг•К).

Для конкретного політропного процесу теплоємність можна вичислити :

$$C_n = C_v \frac{n-k}{n-1}, \quad (3.5)$$

де C_v – ізохорна теплоємність, кДж/(кг•К); k – показник адіабати, який залежить від роду газу.

В разі приблизних розрахунків при не дуже високих температурах можна вважати, що мольні теплоємності i є сталі величини для ідеальних газів і залежать тільки

від атомності газу. Для перерахунку мольних теплоємностей в інші використовуються формули:

$$C_p = \frac{\mu C_p}{\mu}; \quad C_v = \frac{\mu C_v}{\mu}; \quad C'_p = \frac{\mu C_p}{22.4}; \quad C'_v = \frac{\mu C_v}{22.4}, \quad (3.6.)$$

де μ - молекулярна маса газу, кг/кмоль .

Значення мольних теплоємностей і показників адіабати для різних газів наведені в табл . 3.1.

Таблиця 3.1. Мольні теплоємності різних ідеальних газів і відповідні показники адіабати

Газ	μC_v	μC_p	k
	кДж кмоль · К		
Одноатомний	12.5	20.8	1.67
Двохатомний	20.8	29.1	1.40
Трьох- і багатоатомний	29.1	37.4	1.20

Теплоємності C_p і C_v пов'язані між собою рівнянням Майєра:

$$\begin{aligned} C_p - C_v &= R \quad [\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})]; \\ \mu C_p - \mu C_v &= 8.314 \quad [\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})]; \\ \frac{C_p}{C_v} &= k, \end{aligned} \quad (3.7)$$

При точних розрахунках треба враховувати залежність теплоємності від температури. У цьому випадку обчислюють середню теплоємність в інтервалі температур $t_1 \dots t_2$ табличним методом за формулами:

$$Cx_{t_1}^{t_2} = \frac{Cx_0^{t_2} t_2 - Cx_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}; \quad C'x_{t_1}^{t_2} = \frac{C'x_0^{t_2} t_2 - C'x_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}; \quad \mu Cx_{t_1}^{t_2} = \frac{\mu Cx_0^{t_2} t_2 - \mu Cx_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}, \quad (3.8)$$

де $-Cx_0^{t_2}$, $Cx_0^{t_1}$ і т.д. - табличні значення теплоємностей, що визначаються за температурами t_1 і t_2 . Індекс x вказує на рід процесу, в якому визначається теплоємність .

Значення мольних ізобарних теплоємностей газів приведені у додатку 1.

Робота розширення, а також зміна внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії розраховується за наступними формулами:

$$l_{роз} = \frac{1}{n-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) = \frac{RT_1}{n-1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \frac{RT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]; \quad \frac{Дж}{кг} \quad (3.9)$$

$$\Delta u = C_v(T_2 - T_1) \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (3.10)$$

$$\Delta h = C_p(T_2 - T_1) \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (3.11)$$

$$\Delta s = C_n \ln \frac{T_2}{T_1} \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad (3.12)$$

3.2. Будова лабораторної установки

Принципова схема установки для дослідження політропних процесів стиснення і розширення показана на рис. 3.2.

Стиснення повітря у скляному товстостінному циліндрі 7 здійснюється за допомогою води, яка подається насосом 2 по напірному трубопроводу 3. Швидкість подачі води регулюється вентилем 4, а спуск проводиться по зливному трубопроводу 6. Тиск повітря в циліндрі контролюється манометром 9, а об'єм - за допомогою мірної лінійки 8, відградуйованої у кубічних сантиметрах. Початковий рівень води в циліндрі регулюється при атмосферному тиску, для чого необхідно відкрити вентиль 10. Швидкість стиснення (розширення), а отже, і показник процесу n залежить від витрати води, що подається в циліндр, тобто від ступеня відкриття вентилів 4.

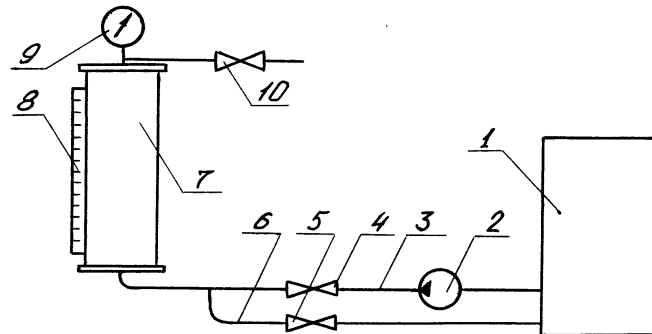


Рис. 3.2 Схема лабораторної установки для вивчення політропного процесу.

3.3. Порядок проведення роботи

1. Відкрити вентиль 10; вентилі 4 і 5 повинні бути закритими.
2. Установити рівень води у циліндрі в нижньому положенні, для чого треба злити надлишки води через зливний трубовід 6 і вентиль 5. При регулюванні рівня не можна допускати, щоб вода повністю витікала з циліндру, тому що для нормальної роботи відцентрового насоса необхідно, щоб він був заповнений водою.
3. Записати початковий об'єм V_1 при атмосферному тиску.
4. Закрити вентиль 10 і включити насос.
5. Регулюючи витрати води за допомогою вентилів 4, стиснути повітря до об'єму V_2 і зафіксувати по манометру тиск P_2 в момент, коли вентиль 4 повністю закритий. Закривати вентиль треба швидко.
6. Повторити досліди 2 - 3 рази, підвищуючи тиск у кожному досліді на 0.5-0.8 ат. В останньому досліді тиск не повинен перевищувати 2.0 ат. В кожному

досліді необхідно записати нові значення тиску P і об'єму V , тому що у проміжок часу між дослідом тиск і об'єм зменшуються. Це пояснюється тим, що при стисненні повітря його температура в циліндрі підвищується а потім відбувається охолодження, оскільки теплота відводиться до навколишнього середовища і води.

7. Виключити насос і провести 1 – 2 досліді процесу розширення. Для цього частина води з циліндру за допомогою вентиля 5 вилити у бак.

8. Результати вимірювань записати в протокол випробувань. Розрахунки проводити без врахування залежності теплоємності від температури.

3.4. Протокол випробувань і розрахунків

Параметр	Позначення	Одиниця вимір.	Дослід			
			Стиснення		Розширення	
1	2	3	4	5	6	7

Атмосферний тиск B мм рт ст

B Па

Температура навколишнього середовища t_l °С
 T_1 К

Об'єм:
початковий V_1 м³
кінцевий V_2 м³

Надлишковий тиск:
початковий P_{1nad} ат
кінцевий P_{2nad} ат

Абсолютний тиск:
початковий P_1 Па
кінцевий P_2 Па

Показник політропи n
Маса газу m кг
Кінцева температура T_2 К

Робота стиснення (розширення) l Дж/кг

Теплоємність політропного процесу C_n Дж/(кг К)

Теплота q Дж/кг

Зміна внутрішньої енергії Δu Дж/кг

Зміна ентальпії Δh Дж/кг

Зміна ентропії Δs Дж/(кг К)

Перевірка по 1 закону

термодинаміки $q = \Delta u + 1$

Після розрахунків і оформлення протоколу випробувань відповісти на наступні запитання :

1. Які з одержаних процесів близькі до ізотермічного і адіабатного; зобразити політропи з визначеними показниками n в Pv – і Ts діаграмах.
2. Як впливає показник політропи на величину роботи, на зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії ?
3. Чи задовольняють одержані результати перший закон термодинаміки ?

Контрольні запитання

1. Що називається політропним процесом ?
2. Покажіть, що основні термодинамічні процеси є окремими випадками політропних процесів.
3. Як визначається показник політропи ?
4. Що таке теплоємність і від чого вона залежить ?
5. Які існують види питомої теплоємності, одиниці їхнього вимірювання ?
6. Які існують співвідношення між ізобарною та ізохорною теплоємностями ?
7. Поясніть фізичний зміст нескінченно великої теплоємності ізотермного процесу, а також від'ємної теплоємності політропного процесу.
8. Лінія якого процесу - ізохорного чи ізобарного - буде більш крутою в Ts діаграмі і чому?

Завдання для самостійної роботи

Задача 3.1. Визначити середню масову теплоємність газу в межах температур t_1, t_2 при сталому тиску. Вихідні дані в табл.3.2.

Таблиця 3.2.

Пара-метр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Газ	CO_2	по віт ря	H_2O	по віт ря	CO	CO_2	H_2O	H_2	N_2	O_2	CO	по віт ря	H_2	N_2	O_2
$t_1, ^\circ C$	100	200	300	400	100	200	300	100	500	100	200	300	400	500	600
$t_2, ^\circ C$	200	400	600	800	700	900	1000	400	1200	300	500	700	500	800	1000

Задача 3.2. Об'єм повітря, який має масу M , кг і t , $^\circ C$ при нагріванні при сталому тиску збільшується в n раз. Визначити кінцеву температуру газу, роботу і кількість теплоти, а також зміну калоричних параметрів $\Delta u, \Delta h, \Delta s$ в цьому процесі. Теплоємність прийняти сталою. Вихідні дані в табл. 3.3.

Таблиця 3.3.

Пара-метр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
M , кг	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
n	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
$t_1, ^\circ C$	20	22	24	26	28	30	32	34	21	23	25	27	29	31	33

Задача 3.3. Азот масою 1.5 кг стискується по політроні з показником n із зменшенням об'єму в m разів. Визначити роботу і кількість теплоти в процесі, а також зміну калоричних параметрів, при початкових t_1 , і P_1 . Показати для цього процесу графіки в Pv - і Ts діаграмах. Теплоємність повітря прийняти сталою. Вихідні дані в табл. 3.4.

Таблиця 3.4.

Пара-метр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
n	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4	1.45	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4
m	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	2.2	2.8	4.0	4.5	5.0	5.5
$t_1, ^\circ\text{C}$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
P_1 , бар	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9

Задача 3.4. 1 кг повітря при початкових параметрах: температурі t_1 , $^\circ\text{C}$ і тиску P_1 , МПа стискується ізотермічно до кінцевого тиску P_2 , МПа. Визначити кінцевий об'єм, роботу, що витрачається і кількість теплоти, яка відводиться від газу. Вихідні дані в табл.3.5.

Таблиця 3.5.

Пара-метр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$t_1, ^\circ\text{C}$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
P_1 , МПа	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
P_2 , МПа	0.8	1.1	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	33

Задача 3.5. З резервуара, що містить вуглекислоту при тиску P_1 , МПа і температурі t_1 , $^\circ\text{C}$ витікає $2/3$ вмісту. Обчислити кінцевий тиск і температуру, якщо в процесі витікання не здійснюється теплообмін з середовищем. Вихідні дані в табл. 3.6.

Таблиця 3.6.

Пара-метр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P_1 , МПа	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
$t_1, ^\circ\text{C}$	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31

[1, с. 80-92; 2, с. 12-20, 32-36; 3, с. 20-26, 33-39, 40-56]

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ВИТІКАННЯ ГАЗУ

Мета роботи: одержати експериментальну залежність швидкості і секундної витрати повітря від відношення тисків на вході і виході при витіканні з звужуючого сопла ; визначити коефіцієнти швидкості і витрати для звужуючого сопла.

4.1. Загальні відомості

Витіканням називається прискорений рух газу через відносно короткі канали особливої форми – сопла, в яких здійснюється падіння тиску. В звужуючих і комбінованих соплах здійснюється перетворення потенційної енергії стиснутого газу в кінетичну.

Процес витікання з сопел можна вважати адіабатним, через те, що сопла являють собою відносно короткі канали і витікання короткочасне. Зв'язок між профілем сопла і максимальною швидкістю витікання встановлюється рівнянням Маха:

$$\frac{df}{f} = \frac{dc}{c} \left(\frac{c^2}{a^2} - 1 \right), \quad (4.1)$$

де f – площа поперечного перерізу сопла; c – швидкість витікання;

a – місцева швидкість звука.

Отже, швидкості витікання $c \leq a$ можуть бути одержані у звужуючих соплах, надзвукові $c > a$ – у комбінованих (соплах Лавалю).

Теоретична швидкість витікання газу у гирлі сопла, м/с: _____

$$c_{2T} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (4.2)$$

а масова витрата: _____

$$M_T = f_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{v_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (4.3)$$

де P_1, P_2 – абсолютний тиск газу відповідно на вході і виході з сопла, Па; v_1 – питомий об'єм газу на вході в сопло, м³/кг; k – показник адіабати; f_2 – площа вихідного перерізу сопла, м².

Аналіз цих формул показує, що швидкість витікання і масова витрата залежить від відношення тисків $P_2/P_1 = \beta$ (Рис. 4.1.)

Оскільки $P_1 \geq P_2$, відношення змінюється від 0 до 1. Залежності швидкості витікання c_{2T} і масової витрати M_T від відношення β , які побудовані згідно рівнянням (4.2.) і (4.3.), зображуються кривими $1k$ і $1k'$. Згідно графікам при зменшенні β (припустимо, якщо $P_1 = const, P_2 \rightarrow 0$) масова витрата спочатку збільшується (крива $1k'$) від нульового при $\beta = 1$ до деякого максимуму, а потім зменшується (крива $1k'0$), а швидкість весь час збільшується. Експериментальні дані витікання з сопел показують, що витрата після досягнення максимуму при подальшому зменшенні β залишається незмінною і має максимальне значення (крива $1k'b$). Така суперечність між теорією і експериментальними даними пояснюється слідуючим. Якщо зменшити тиск P_2 на виході з сопла (P_1 залишається сталим), тобто зменшити відношення β , повинен здійснитись перерозподіл тиску вздовж сопла, яке протікає із швидкістю, що дорівнює місцевій швидкості звука a . Поки швидкість витікання c_{2T} буде менша швидкості звуку (крива $1k$), перерозподіл тиску здійснюється з відносною швидкістю, яка дорівнює різниці $a - c_{2T}$, а тиск у гирлі сопла дорівнює тиску навколишнього середовища P_2 . При зменшенні величини β ця різниця буде зменшуватись і при максимальній витраті буде дорівнювати нулю, а швидкість витікання $c_{2T} = a$. Цьому моменту

відповідає відношення $\beta_{кр}$, яке називається критичним, а у гирлі сопла встановлюється тиск $P_{2кр}$ більший, ніж тиск P_2 навколишнього середовища. При подальшому зниженні тиску $P_2 \Rightarrow 0$ хвиля перерозподілу тиску не зможе розповсюджуватись вздовж сопла, через те що її швидкість $a = c_{2T}$, отже, відносна швидкість $a - c_{2T}$ буде дорівнювати нулю.

Якщо дослідити рівняння (4.2) на максимум, можна встановити, що:

$$\beta_{кр} = \frac{P_{2кр}}{P_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (4.4)$$

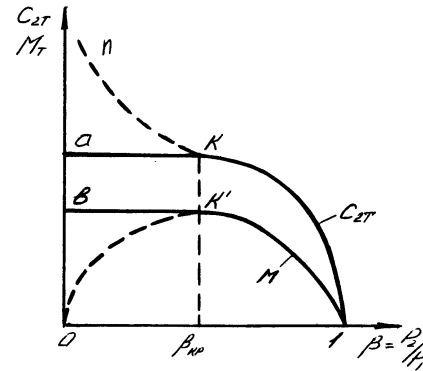


Рис 4.1. Залежність швидкості і витрати при витіканні від перепаду тисків

Як видно з рівняння, критичне відношення $\beta_{кр}$ не залежить від параметрів газу, а залежить тільки від його роду. Якщо прийняти для двохатомних газів $k = 1.4$, $\beta_{кр} = 0.528$; якщо для багатоатомних і перегрітої пари $k = 1.29$, то $\beta_{кр} = 0.546$.

Якщо підставити у рівняння (4.2) і (4.3) $\beta = \beta_{кр}$ з рівняння (4.4), одержимо критичну швидкість, м/с:

$$c_{2T} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_1}, \quad (4.5)$$

і максимальну витрату газу, кг/с:

$$M_T = f_2 \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{P_1}{\nu_1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}. \quad (4.6)$$

Таким чином, крива $1ka$ (рис.4.1) характеризує залежність швидкості витікання від β для звужуючих сопел, $1kn$ – для комбінованих; крива $1k'b$ – залежність масової витрати від β для обох типів сопел.

Для реальних газів дійсна швидкість витікання і масова витрата завжди менші від теоретичних, що пояснюється появою необоротних втрат на тертя.

Відношення дійсної масової витрати до теоретичної називається коефіцієнтом витрати:

$$\varphi = \frac{M_{kg}}{M_T}. \quad (4.7)$$

$$\mu = \frac{C_{2g}}{C_{2T}}. \quad (4.8)$$

4.2 Будова лабораторної установки

Процес витікання із звужуючого сопла досліджують на лабораторній установці (рис. 4.2).

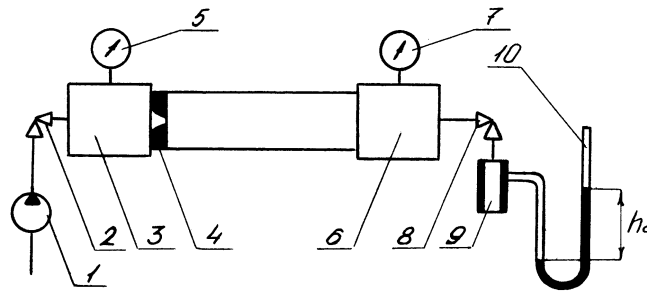


Рис. 4.2. Принципова схема установки для дослідження процесу витікання

Компресор 1 подає повітря у передсоплову камеру 3. Через звужуюче сопло 4 повітря витікає у камеру 6. Витрата і тиск повітря на вході і виході з сопла регулюється відповідно вентилями 2 і 8. Тиск повітря вимірюється манометрами 5 і 7, які підключені до передсоплової 3 і післясоплової 6 камерам.

Для вимірювання дійсної витрати повітря встановлено вимірювальний пристрій 9, який виконаний у вигляді циліндру діаметром 3.5 мм, до якого підключений рідинний манометр 10, за допомогою якого вимірюється швидкісний напір повітря. Звужуюче сопло, що встановлено між камерами 3 і 6, має на виході діаметр $d_2 = 1$ мм.

4.3 Порядок проведення роботи

1. Відкрити вентиль 2, а вентиль 8 повністю закрити.
2. Ознайомитись з розташуванням приладів і системами відліку.
3. Включити компресор і вентилем 8 установити мінімальну витрату.
4. Записати показання манометрів, барометра, термометра у протокол випробувань.
5. Повторити досліди 5–6 разів, регулюючи витрату повітря вентилем 8.
6. Після закінчення дослідів виключити компресор.

4.4 Порядок розрахунку

1. Виміряні величини перевести в одиниці СІ.
2. Оскільки температури повітря на вході і виході з сопла не змінюються, можна визначити їх розрахунковим методом, вимірюючи температуру навколишнього середовища $T_{навк}$ і атмосферний тиск B . Вважаємо стиснення у компресорі політропним з показником $n = 1.03...1.05$.

3. Розрахунки необхідно виконувати у послідовності, яка викладена в протоколі випробувань і розрахунків. Один з дослідів необхідно розрахувати вручну, а потім на мікрокалькуляторі.

4. За результатами розрахунків побудувати графіки.

$$C_{2T} = f_1(\beta); \quad M_T = f_2(\beta); \quad C_{2g} = f_3(\beta); \quad M_g = f_4(\beta).$$

Протокол випробувань і розрахунків

Параметр	Позначення	Од.вимір	Розрах. Формула	Дослід						
				1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Діаметр вихідно-

го перерізу сопла d_2 м $1 \cdot 10^{-3}$

Площа попереч-

ного перерізу f_2 м² $\frac{\pi d_2^2}{4}$

Діаметр витра-

томірного при-

строю d_3 м $3.5 \cdot 10^{-3}$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----

Площа

поперечного

перерізу f_3 м² $\frac{\pi d_3^2}{4}$

Атмосферний

тиск B мм рт. ст.
Па

Надлишковий

тиск:

на вході в сопло $P_{1над}$ кгс/см²
Па

на виході з сопла $P_{2над}$ кгс/см²
Па

Швидкісний напір $P_{шв}$ мм вод. ст.
Па

Температура зов-

нішнього повітря $T_{навк}$ К

Абсолютний тиск:

на вході в сопло P_1 Па (2.4)

на виході з сопла P_2 Па (2.4)

Відношення тисків $\beta = P_1/P_2$

Температура

повітря :

на вході в сопло $T_1 = T_{навк}$ К (3.2)

на виході з сопла T_2 К (3.2)

Теоретична швид-

кість витікання C_{2T} м/с (4.2)

Густина повітря

за соплом ρ_2 кг/м³ (2.16)

Теоретична ма-

сова витрата M_T кг/с $\rho_2 f_2 C_{2T}$

Густина повітря

у витратомірному

пристрої ρ_3 кг/м³ (2.16)

Швидкість повіт-

ря у витратомір-

ному пристрої C_3 м/с (2.12)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----

Дійсна масова

витрата M_g кг/с $\rho_3 f_3 C_3$

Дійсна швидкість

витікання C_{2g} м/с $M_g / (\rho_2 f_2)$

Максимальна

швидкість виті-

кання $C_{2кр}$ м/с (4.5)

Максимальна

витрата повітря M_{max} кг/с (4.6)

Коефіцієнт:

витрати φ (4.7)

швидкості μ (4.8)

Контрольні запитання

1. Що таке витікання газу і де воно застосовується ?
2. Від чого залежать швидкість витікання і масова витрата ?
3. Особливості витікання із звужуючих сопел.
4. В яких соплах можна одержати надзвукові швидкості ?
5. Що таке критичне відношення тисків і від чого воно залежить ?

Завдання для самостійної роботи

Задача 4.1 Повітря із сталим абсолютним тиском P_1 і температурою t_1 витікає з резервуару в атмосферу через комбіноване сопло з діаметром вузької частини d_2 . Визначити швидкість витікання повітря і його секундну витрату. Зовнішній тиск прийняти P_2 . Процес розширення повітря вважати адіабатним. Вихідні дані в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P_1 , МПа	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.0	8.0
t_1 , °C	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
P_2 , МПа	0.1	0.12	0.14	0.15	0.16	0.18	0.2	0.1	0.05	0.06	0.08	0.09	0.1	0.15	0.2
d_2 , мм	1.0	2.0	1.5	2.5	1.3	1.8	2.2	2.0	2.4	2.7	3.0	2.6	2.1	2.0	2.3

Задача 4.2. В резервуарі з киснем підтримується тиск по манометру P_1 . Газ витікає через звужуюче сопло в середовище з тиском P_2 . Початкова температура кисню t_1 . Визначити теоретичну швидкість витікання і витрату, якщо площа вихідного перерізу сопла f . Знайти також теоретичну швидкість витікання кисню і його витрату, якщо витікання буде здійснюватися в атмосферу. В обох випадках вважати витікання адіабатним. Барометричний тиск прийняти 0.1 МПа. Вихідні дані в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P_1 , МПа	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
P_2 , МПа	2.0	2.6	2.8	4.0	3.1	4.4	3.2	5.2	5.8	4.5	5.2	5.8	6.0	7.5	6.0
f , мм ²	20	30	25	35	22	24	26	28	30	18	20	22	24	26	28
t_1 , °C	20	10	-10	-5	0	15	25	30	35	40	-20	-15	-30	10	25

Задача 4.3. Визначити теоретичну швидкість витікання пари через сопло Лавалю, якщо тиск пари P_1 , температура t_1 , а протитиск дорівнює P_2 . Процес розширення пари в соплі вважати адіабатним. Вихідні дані в табл.4.3

Таблиця 4.3

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P_1 , МПа	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2

t_1 , °C	250	280	300	320	350	380	400	420	450	480	500	520	550	580	600
P_2 , кПа	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	12.0	15.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	12.0

Задача 4.4. Визначити теоретичну швидкість витікання пари з котла в атмосферу. Тиск пари в котлі P_1 , температура t_1 . Процес розширення вважати адіабатним. Барометричний тиск дорівнює 100 кПа. Вихідні дані в табл. 4.4.

Таблиця 4.4.

Па- ра- метр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P_1 , МПа	2.8	2.9	2.0	2.1	3.2	3.3	2.4	2.5	2.85	2.9	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5
t_1 , °C	250	280	300	320	350	380	300	320	350	380	400	420	450	480	500

Задача 4.5. Розв'язати задачу 4.4 при умові, що витікання пари здійснюється через сопло Лавалю.

[1, с. 80–91; 2, с. 47–54; 3, с. 43–48]

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВОДЯНОЇ ПАРИ

Мета роботи: вивчити властивості водяної пари, методи визначення її параметрів, навчитися користуватися таблицями та діаграмами водяної пари для розрахунку термодинамічних процесів.

5.1. Загальні відомості

Пара є 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 з 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

$$\text{сухості } X - \text{відношенням маси сухої насиченої пари } m_{c,n} \text{ до маси вологої пари } m_{e,n}: X = \frac{m_{c,n}}{m_{e,n}} \quad (5.1)$$

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

В процесі кипіння при $P = \text{const}$ 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_n . Чим вище тиск, тим більше температура насичення t_n . Теплота, що витрачається на перетворення 1 кг води, нагрітої до температури насичення t_n , 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_n . Така пара називається перегрітою, а її температура – температурою перегріву пари $t_{n,n}$.

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 (v_x, h_x, s_x).

Термодинамічні властивості води і водяної пари приводяться в спеціальних таблицях (додаток 2-4) і дозволяють виконувати всі необхідні розрахунки, пов'язані із застосуванням водяної пари.

Формули для розрахунку параметрів води і водяної пари наведені у табл. 5.1.

Діаграма h_s , в якій теплота, ентальпія і ентропія вимірюються лінійними відрізками, застосовується для розрахунку термодинамічних процесів водяної пари. На осі абсцис діаграми (рис. 5.1) відкладені значення питомої ентропії s , а по осі ординат – питомої ентальпії h . На діаграмі нанесені нижня ($x = 0$) і верхня ($x = 1$) пограничні криві. 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 $P = \text{const}$, а з критичної точки K – пучок кривих $x = \text{const}$. 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 угору логарифмічними кривими, а ізотерми направлені вправо.

Таблиця 5.1.

Формули для розрахунку параметрів води і водяної пари

Величина	Вода	Пара		
		волога	суха	перегріта
Ентальпія, кДж/кг	$h' = C_p^{pi0} t_n$	$h_x = h' + xr = (1-x)h' + xh''$	$h'' = h' + r$	$h_{nn} = h'' + C_{pn} t_{nn}$
Питомий об'єм, м³/кг	v'	$v_x = v''x + (1-x)v'$	v''	v_{nn}
Ентропія, кДж/(кг К)	$s' \cong C_{pv} \ln \frac{T_n}{273}$	$s_x = s' + \frac{rx}{T_n}$	$s'' = s' + \frac{r}{T_n}$	$s_{nn} = s'' + C_{pn} \ln \frac{T_{nn}}{T_n}$

На діаграмі нанесені також штрихпунктирними лініями ізохори $v = \text{const}$. Побудова термодинамічних процесів здійснюється по лініях: ізохорний – за ізохорою $v = \text{const}$, ізобарний – $P = \text{const}$, ізотермічний – $t = \text{const}$, адіабатний – $s = \text{const}$, ізоентальпійний – $h = \text{const}$. Для побудови процесу необхідно знати два початкових і один

кінцевий параметр. Точки початку і кінця процесу знаходяться на перетинанні відповідних кривих (наприклад, ізобари P та ізотерми t – початок процесу; ізобара і ступінь сухості x – для кінця процесу).

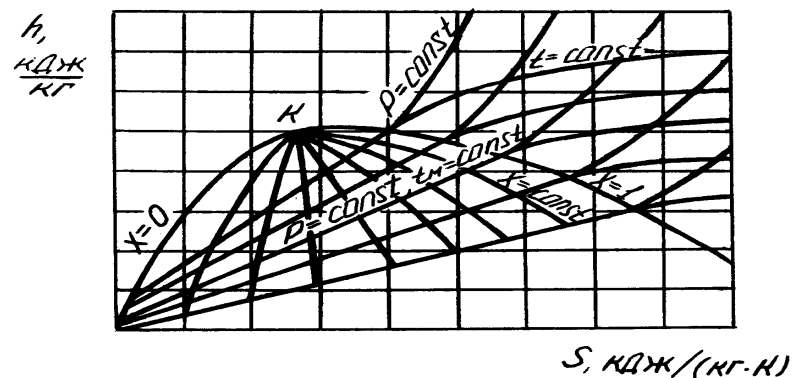


Рис. 5.1. Загальний вид hs – діаграми водяної пари

Розрахункові співвідношення для обчислення зовнішньої роботи, кількості теплоти і зміни внутрішньої енергії в термодинамічних процесах водяної пари приведені в табл.5.2.

Таблиця 5.2

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	$\Delta u_s = (h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - P_1 v_1)$	$l_s = -\Delta u$	$q_s = 0$

Приклад 1. Користуючись таблицями та hs – діаграмою водяної пари, знайти питомий об'єм, ентальпію, внутрішню енергію і ентропію вологої пари при $P_{абс} = 0.5$ МПа і вологістю 15 %.

Розв'язання за допомогою таблиці.

Вологістю називають величину $(1 - x)$ і тому ступінь сухості $x = 85$ %. Із таблиць водяної пари (додаток 2), для тиску 0.5 МПа: $t_n = 151.8$ °С; $v' = 0.0010927$ м³/кг; $v'' = 0.3748$ м³/кг; $h' = 640.1$ кДж/кг; $h'' = 2748.5$ кДж/кг; $r = 2108.4$ кДж/кг; $s' = 1.8605$ кДж/(кг К); $s'' = 6,8221$ кДж/(кг К).

Використовуючи формули табл. 5.1, знаходимо для вологої пари питомий об'єм:

$$v_x = v''x + (1 - x)v' = 0.3748 \cdot 0.85 + 0.001097 \cdot 0.15 = 0.3187 \text{ м}^3/\text{кг};$$

ентальпія: $h_x = h' + xr = 640.1 + 0.85 \cdot 2108.4 = 2432.24 \text{ кДж/кг}$; ентропія:

$$s_x = s' + \frac{xr}{T_n} = 1.8605 + \frac{2108.4 \cdot 0.85}{273 + 151.8} = 6.0795 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

внутрішня енергія: $u_x = h_x - P v_x = 2432.24 - 0.5 \cdot 10^6 \cdot 0.3187 \cdot 10^{-3} = 2273 \text{ кДж/кг}$.

Розв'язання за допомогою hs – діаграми

На діаграмі знайти т. А на перетині ізобари $P = 0.5 \text{ МПа}$ і лінії сталої ступіні сухості $x = 0.85$ (рис.5.2, а), для якої визначити v_x , h_x , s_x і t_n , а потім обчислити u_x .

Приклад 2. В початковому стані перегріта пара має тиск $P_1 = 7 \text{ МПа}$ і температуру $t_1 = 400^\circ\text{C}$. Які будуть вологість і температура цієї пари в кінці оборотного адіабатного розширення, якщо кінцевий тиск $P_2 = 0.3 \text{ МПа}$? Визначити також різницю ентальпій.

Розв'язання. Задача розв'язується за допомогою hs – діаграми. Будується процес адіабатного розширення 1 – 2 по лінії $s = \text{const}$ (рис.5.2, б). Для цього необхідно знайти на діаграмі точку 1 на перетині ізобари $P_1 = 7 \text{ МПа}$ і ізотерми $t_1 = 400^\circ\text{C}$ та провести через нею адіабату до перетину з ізобарою $P_2 = 0.3 \text{ МПа}$. Для точок 1 і 2 знайти h_1 , h_2 , x_2 , t_n . При визначенні t_n необхідно знайти точку перетину ізобари P_2 з верхньою граничною кривою $x = 1$ і з'ясувати, яка ізотерма виходить із точки перетинання.

$h_1 = 3160 \text{ кДж/кг}$; $h_2 = 2515 \text{ кДж/кг}$; $x_2 = 0.902$; $t_n = 135^\circ\text{C}$;

$\Delta h = h_1 - h_2 = 3160 - 2515 = 645 \text{ кДж/кг}$.

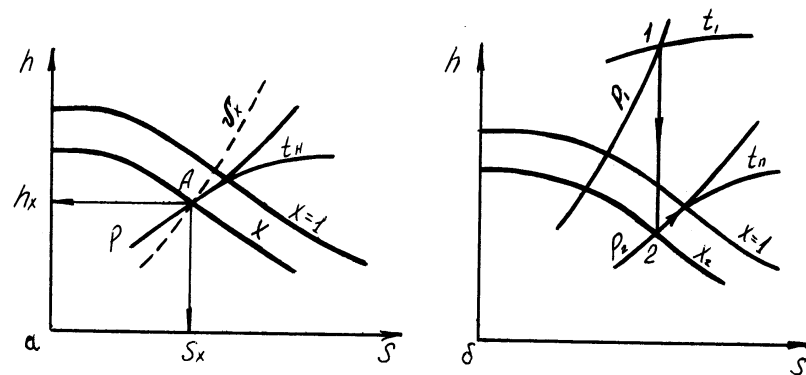


Рис. 5.2 Застосування hs – діаграми: а – до прикладу 1; б – до прикладу 2.

Завдання для самостійної роботи

Завдання 5.1. Використовуючи таблиці (додаток 2, 4) і діаграму водяної пари, визначити вид пари, питомий об'єм, ентальпію, ентропію і внутрішню енергію, якщо відомі тиск P та температура t , значення яких вказані в табл. 5.3. Відповіді повинні бути для табличного і діаграмного методів. Порівняти результати.

Таблиця 5.3

Па-	Варіант
-----	---------

параметр	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 , °C	250	280	260	300	290	310	320	330	260	350	360	340	400	300	320

Завдання 5.2. Умови ті ж, що і в завданні 1, але задані тиск P і ступінь вологості $(100 - x)$ %, значення яких вказані в табл. 5.4

Таблиця 5.4

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	15

Завдання 5.3. В ідеальному паросиловому циклі Ренкіна пара перед турбіною має тиск P_1 і температуру t_1 . Визначити роботу 1 кг пари, термічний ККД та питому витрату пари, якщо тиск у конденсаторі паротурбінної установки P_2 . Вихідні дані взяти з табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P_1 , МПа	2.0	2.4	3.0	3.4	3.8	4.0	4.5	5.0	5.2	5.4	6.0	6.5	7.0	7.2	8.0
t_1 , °C	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500	540	560	580	510
P_2 , кПа	3	4	5	3	4	5	3	4	5	3	4	5	3	4	5

Завдання 5.4. Як зміняться всі показники циклу Ренкіна, розглянутого в завданні 3, якщо:

- початковий тиск P_1 збільшити на 2 МПа?
- температуру пари при тиску P_1 збільшити на 50°C?

Зробити висновки.

Контрольні питання та завдання

- Що називається пароутворенням, випаровуванням, кипінням, конденсацією?
- Опишіть процес одержання перегрітої пари і проілюструйте його за допомогою Pv – діаграми водяної пари.
- Яку пару називають вологою насиченою, сухою насиченою та перегрітою?

4. Що таке критична точка?
5. Що таке теплота пароутворення, конденсації? Їхні 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 Pv і Ts – діаграмах?
8. В чому особливість розрахунку ізотермного процесу водяної пари у порівнянні з ідеальним газом?
9. Зобразіть цикл Ренкіна в Pv і Ts діаграмах і опишіть схему паросилової установки, в якій він здійснюється.
10. Як визначити термічний ККД і питому витрату пари в циклі Ренкіна?

[1, с. 162–173; 2, с. 36 – 42; с. 33 – 41, 68 – 72]

Лабораторна робота № 6

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи: експериментально визначити коефіцієнт теплопровідності твердого матеріалу; визначити залежність коефіцієнтів теплопровідності від температури.

В процесі виконання роботи необхідно вивчити слідуючі питання:

1. Фізичну суть процесу теплопровідності.
2. Основний закон теплопровідності і поняття про коефіцієнт теплопровідності.

6.1. Загальні відомості

Теплопровідність є процес розповсюдження теплової енергії при безпосередньому стиканні окремих часток або окремих тіл, що мають різні температури.

Здатність тіл проводити теплоту характеризується фізичним параметром, який називається коефіцієнтом теплопровідності, Вт/(м•К):

$$\lambda = \frac{Q}{f \frac{\partial t}{\partial n}}, \quad (6.1)$$

де Q - потужність теплового потоку, Вт; f - площа, м², $\frac{\partial t}{\partial n}$ – температурний градієнт, К/м.

Числове значення коефіцієнта теплопровідності визначає кількість теплоти, що проходить крізь одиницю поверхні в одиницю часу, при умові, що температурний градієнт дорівнює одиниці.

Коефіцієнт теплопровідності залежить від температури, тиску і роду речовини. Кращими провідниками теплоти є метали ($\lambda = 3...418$ Вт/(м•К)).

Коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційних і будівельних матеріалів, які мають шпаристу структуру, змінюється в межах від 0.02 до 3.0 Вт/(м•К)

Коефіцієнт теплопровідності може бути визначений методами необмеженого циліндричного шару, коли матеріалу, що досліджується, надається форма циліндричної порожньої труби; монотонного режиму, коли матеріалу, що досліджується, надається форма тонкої круглої або квадратної пластинки; кульового шару, коли матеріал, що досліджується, має форму кульового шару.

Метод необмеженого циліндричного шару

Для зменшення теплових втрат у різних теплотехнічних спорудах застосовують так звані теплоізоляційні матеріали, коефіцієнт теплопровідності яких необхідно знати. В цьому випадку коефіцієнт теплопровідності визначають методом необмеженого циліндричного шару (метод труби).

Суть методу полягає в тому, що досліджуваний матеріал у вигляді циліндричного шару розташовують на поверхні труби, яка з середини рівномірно обігрівається. При встановленому тепловому стані системи вся кількість теплоти, що виділилась з середини труби, проходить крізь шар матеріалу і визначається наступним рівнянням, Вт:

$$Q = \frac{\pi \cdot l \cdot (t'_{cm} - t''_{cm})}{\frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (6.2)$$

де l - довжина труби, м; d_1, d_2 - відповідно внутрішній і зовнішній діаметр циліндричної труби; t'_{cm}, t''_{cm} - температура відповідно внутрішньої і зовнішньої стінок ізоляційного шару, °C.

З рівняння (6.2) можна знайти коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м*K):

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l (t'_{cm} - t''_{cm})}. \quad (6.3)$$

Таким чином, для визначення λ необхідно виміряти величину Q, t'_{cm}, t''_{cm} і геометричні розміри d_1, d_2, l .

6.2. Експериментальна установка

Схема експериментальної установки зображена на рис.1.1.

На сталеву трубу 1 діаметром $d = 0.07$ м і довжиною $l = 1,22$ м нанесено шар ізоляційного матеріалу 2, який досліджується товщиною $\delta = 0.0375$ м. Всередині труби закладений електричний нагрівач 3. Сила струму регулюється лабораторним автотрансформатором 14. Сила струму і напруга вимірюється амперметром 12 і вольтметром 13. Температура матеріалу, що досліджується, вимірюється термометрами опору, які щільно прилягають до зовнішньої (5,7,9) і внутрішньої (4,6,8) поверхонь шару ізоляції і через перемикач 10 підключені до логометра 11.

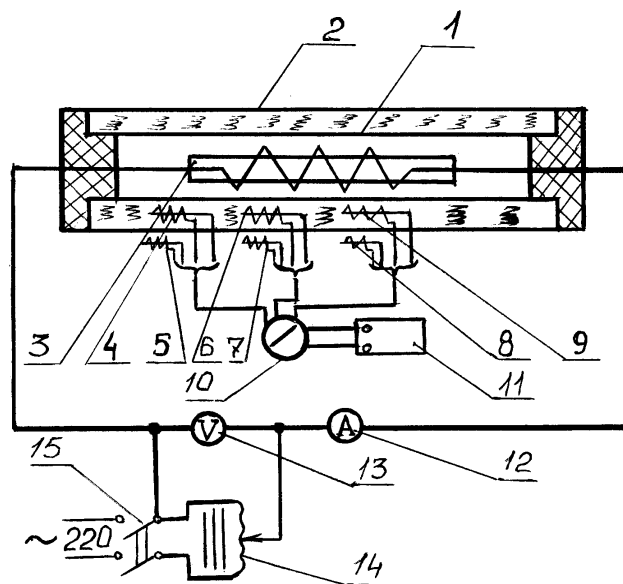


Рис. 1.1. Принципова схема установки для визначення коефіцієнта теплопровідності методом труби.

Живлення установки здійснюється від мережі з перемінною напругою 220 В через вимикач 15.

За значенням струму і напруги в мережі визначається теплота, що виділяється нагрівачем. Циліндричний зразок має більшу довжину в порівнянні з діаметром, що дозволяє створювати рівномірний тепловий потік за довжиною при відповідній якості опору нагрівача. Для зменшення теплових втрат через торці на кінцях труби є коробки, що заповнені ізоляцією.

6.3. Порядок проведення роботи

1. Ознайомитись з лабораторною установкою, методикою проведення дослідів, приготувати протокол випробувань.
2. Оскільки для досягнення стаціонарного теплового режиму потрібно 3–4 години, лаборант повинен завчасно ввімкнути установку.
3. Для того, щоб переконатися, що тепловий режим стаціонарний, необхідно 3–4 рази (через 5-7 хвилин) зняти температурне поле. Якщо температура у кожній точці не змінюється у часі, режим усталений.
4. Зняти показання приладів.
5. За допомогою ЛАТР змінити режим і повторити дослід.

Протокол досліджень

6.4. Обробка результатів досліду

Маючи для кожної величини ряд значень, виміряних при стаціонарному режимі, обчислюють середні арифметичні значення. Звичайно для розрахунку беруть значення показань приладів з останніх трьох записів.

Коефіцієнт теплопровідності λ обчислюють за (6.3). Кількість теплоти Q визначають з потужності, що споживається електричними нагрівачами, Вт:

$$Q = U \cdot I. \quad (6.4)$$

Якщо одержані декілька значень λ при різних температурах, будують графік залежності коефіцієнта теплопровідності від середньої температури матеріалу, що досліджується:

$$\lambda = f(t_{cp}), \quad t_{cp} = \frac{t_{cp}^n + t_{cp}^e}{2}.$$

Контрольні запитання:

1. Що називається теплопровідністю?
2. Яким законом описується перенос теплоти теплопровідністю?
3. Що називається коефіцієнтом теплопровідності і від чого він залежить?
4. Опишіть особливості теплопровідності різних речовин.
5. Як обчислюють тепловий потік теплопровідністю через одношарову і багатошарову стінки?

Задача 6.1 Сталева стінка парового котла товщиною δ_2 вкрита з одного боку шаром сажі товщиною δ_1 , а з другого – шаром накипу товщиною δ_3 . Через стінку проходить питомий тепловий потік q . Визначити загальний термічний опір і загальне падіння температури стінки. Значення коефіцієнтів теплопровідності: для сажі $\lambda_1 = 0.1$ Вт/(м К); для вуглецевої сталі $\lambda_2 = 50$ Вт/(м К); для накипу $\lambda_3 = 1.5$ Вт/(м К). Вихідні дані в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Пара-метр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ_1 , мм	0.2	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.15	0.25	0.35	0.45
δ_2 , мм	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
δ_3 , мм	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	1.5	2.0

Номер досліду при	Напруга U, В	Сила струму I, А	Температура на внутрішній поверхні ізоляції				Температура на зовнішній поверхні ізоляції			
			t'_{cm}	t''_{cm}	t'''_{cm}	t'_{cp}	t'_{cm}	t''_{cm}	t'''_{cm}	t''_{cp}
1										
2										
3										
4										

Пара-метр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ , мм	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	4.5
h , мм	1.5	1.8	2.0	2.2	3.0	2.5	3.5	2.8	3.0	3.0
S , мм	0.25	0.4	0.45	0.3	0.35	0.5	0.3	0.35	0.4	0.45
t_{cm1} 10^2 , °C	10	10.5	11	11.5	12	9.5	9.0	8.5	8.0	8.2
t_{cm2} 10^2 , °C	40	45	50	55	60	65	70	75	40	45

$q \cdot 10^2$, Вт/м ²	80	80	80	85	85	95	95	90	90	90
---------------------------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Задача 6.2 Визначити тепловий потік через стінку печі з вогнетривкої цегли [$\lambda = 12$ Вт/(м К)] завширшки δ , заввишки h і завтовшки S , якщо на поверхнях стінки підтримуються температури t_{cm1} і t_{cm2} . Визначити витрату натурального і умовного палива, еквівалентну розрахованим тепловим втратам, якщо к. к. д. печі 0.6, теплота згоряння палива 32000 кДж/кг. Вихідні дані в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Задача 6.3. Стінка циліндричної форми зроблена з матеріалу, середній коефіцієнт теплопровідності якого $\lambda = 0.6$ Вт/(м К), а температура на внутрішній поверхні стінки t_{cm1} . Визначити температуру зовнішньої поверхні стінки t_{cm2} , якщо виміряний тепловий потік через стінку при $\tau = 300$ с становить $60 \cdot 10^3$ Дж/м. Внутрішній і зовнішній діаметри дорівнюють d_1 і d_2 . Вихідні дані в табл. 6.3.

Таблиця 6.3

Пара- метр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_{cm1} , °C	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135
d_1 , мм	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.1	0.15	0.25
d_2 , мм	0.5	0.45	0.4	0.35	0.55	0.6	0.65	0.3	0.35	0.4

Лабораторна робота № 7

ТЕПЛОВІДДАЧА ЦИЛІНДРИЧНОЇ ТРУБИ ПРИ ПРИРОДНІЙ КОНВЕКЦІЇ

Мета роботи: експериментально визначити коефіцієнт тепловіддачі при природній конвекції; вивчити методику коефіцієнта тепловіддачі за допомогою

критеріальних рівнянь.

7.1. Загальні відомості

Теплообмін між потоком рідини або газу і поверхнею тіла, що контактує з ним, називається конвективним теплообміном або просто тепловіддачею. Тепловіддача характеризується законом Ньютона – Ріхмана, Вт:

$$Q = \alpha f_1 (t_{cm} - t_{pid}), \quad (7.1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²•К);

t_{cm}, t_{pid} – температура відповідно стінки і навколишнього середовища, °С;

f_1 – площа поверхні, м².

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією враховує контактні умови тепловіддачі. Згідно з рівнянням (7.1):

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{f_1 (t_{cm} - t_{pid})}, \text{ при } t_{cm} > t_{pid} \text{ або } \alpha_k = \frac{Q_k}{f_1 (t_{pid} - t_{cm})}, \text{ при } t_{cm} < t_{pid}. \quad (7.2)$$

З рівняння (7.2) видно, що коефіцієнт тепловіддачі чисельно дорівнює потужності теплового потоку через поверхню теплообміну при різниці температури поверхні і навколишнього середовища в один градус.

Основні труднощі розрахунку конвективного теплообміну полягають у визначенні α_k , який залежить від багатьох факторів: фізичних властивостей рідини (густина, в'язкість, теплоємність, теплопровідність), форм і розмірів поверхні, температури поверхні і рідини, розташування поверхні у просторі, швидкості руху, природи виникнення руху рідини.

В цій роботі потрібно встановити залежність коефіцієнта тепловіддачі конвекцією від різниці температур $\Delta t = t_{cm} - t_{pid}$, тобто $\alpha = f(\Delta t)$.

Для цього необхідно знати величину конвективного теплового потоку Q_k . Проте треба враховувати, що від нагрітої поверхні теплота Q віддається навколишньому середовищу не тільки конвекцією Q_k , але й випромінюванням у кількості $Q_{\text{л}}$. Таким чином:

$$Q = Q_k + Q_{\text{л}}, \quad (7.3)$$

Променевий тепловий потік розраховується за допомогою рівняння, Вт

$$Q_{np} = C f_1 \left[\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{pid}}{100} \right)^4 \right], \quad (7.4)$$

де $C = C_0 \varepsilon_{np}$ – коефіцієнт випромінювання, Вт/(м²•К⁴); $C_0 = 5.67$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м² К⁴); T_{cm}, T_{pid} – абсолютні температури, відповідно, стінки і рухомого середовища, К; ε_{np} – приведений ступінь чорноти.

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{f_1}{f_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (7.5)$$

де f_1, f_2 – площі відносно тепловіддаючої поверхні і огорожуючих стін, м². Якщо $f_1 \gg f_2$, то $\varepsilon_{np} = \varepsilon_1$.

Ступінь чорноти залежить від роду і температури матеріалу і визначається за допомогою довідкових таблиць. Наприклад, сталь окислена шорстка має $\varepsilon = 0.94 \dots 0.97$ при $t = 40 \dots 370$ °C, алюміній шорсткий має $\varepsilon = 0.11 \dots 0.19$ при $t = 200 \dots 600$ °C.

Таким чином, якщо виміряти тепловий потік, температуру поверхні тіла і навколишнього середовища, то можна експериментально визначити коефіцієнт тепловіддачі конвекцією α_k .

На основі законів фізики можна скласти систему диференціальних рівнянь для конвективного теплообміну, що враховують як теплові так і гідродинамічні явища процесу. Зважаючи на те, що для конкретного процесу ці рівняння повинні бути доповнені умовами однозначності, математичний опис конвективного теплообміну є настільки складним, що аналітичне рішення можливе тільки внаслідок значаних допоміжних спрощень. Отримані результати аналітичних рішень, як правило, мають невелику практичну цінність. Тому для конкретних задач конвективного теплообміну коефіцієнта тепловіддачі визначають експериментальним шляхом. Але розповсюдження результату одиночного дослідження на інші конкретні випадки приводить до грубих помилок, внаслідок складної залежності коефіцієнту тепловіддачі від багатьох факторів.

Об'єднання обох цих методів за допомогою теорії подібності дозволяє узагальнити результати одиничних дослідів на цілу групу подібних явищ даного класу. На основі диференціальних рівнянь за допомогою теорії подібності розмірні фізичні змінні величини можна об'єднати у безрозмірні комплекси або критерії подібності.

Теорія подібності стверджує, що залежність між змінними, які характеризують процес, може бути представлена у вигляді залежності між критеріями (числами) подібності. Така функціональна залежність між числами подібності називається рівнянням подібності.

При розв'язанні рівнянь подібності особливу увагу треба звертати на визначальну температуру і визначальний розмір l . Визначальною називається температура, за якою визначають фізичні властивості середовища, що входять в критерії подібності. Визначальний розмір – це характерний лінійний розмір, який визначає розвиток процесу.

Для круглих вертикально розташованих труб за визначальний розмір береться висота труби, для горизонтально розташованих – її зовнішній діаметр.

Вільна конвекція описується рівнянням у безрозмірному вигляді

$$Nu = f(Gr, Pr), \quad (7.6)$$

де Nu – безрозмірний критерій тепловіддачі Нуссельта; Gr – критерій Грасгофа - критерій, який характеризує співвідношення підйомної сили, що виникає внаслідок різниці густини рідини і сили молекулярного тертя; Pr – критерій Прандтля, визначаються за формулами:

$$Nu = \alpha l / \lambda, \quad (7.7)$$

$$Gr = \frac{g \beta l^3 \Delta t}{\nu^2}, \quad (7.8)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (7.9)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² К); l – характерний розмір, м; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м² К); $\beta = \frac{1}{T_{pi\partial}}$ – коефіцієнт об’ємного розширення, 1/К; Δt – різниця температур, К; ν – кінематичний коефіцієнт в’язкості, м²/с; $a = \frac{\lambda}{C_p \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, м²/с; C_p – питома теплоємність, Дж/(кг К); ρ – густина, кг/м³.

А також критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{wl}{\nu}, \quad (7.10)$$

який визначає фізичні властивості середовища.

Залежність між критеріями встановлюється дослідним шляхом. В (7.6) визначеному числовому значенню кожного критерія відповідає нечислове значення кожного з параметрів (наприклад, для критерія Грасгофа – T, l, ν). Але кожному значенню параметра відповідає конкретний випадок. Отже, рішення у формі (7.6) справедливе для незчисленної кількості тих поодиноких випадків, у яких однакові критерії Грасгофа і Прандтля, тому воно носить узагальнений характер.

На основі рівняння (7.6) можна визначити значення числа Нуссельта, а отже, відповідне значення коефіцієнта тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{l}. \quad (7.11)$$

При проведенні лабораторної роботи повинні бути одержані дані, за допомогою яких встановлюється залежність для вільної конвекції $\alpha=f(\Delta t)$. Ця залежність може бути також описана емпіричною формулою, наданої у вигляді степенної функції

$$\alpha = C_1(\Delta t)^n. \quad (7.12)$$

Формула (7.12) – окрема, справедлива тільки для умов досліду. Щоб результати цього досліду можна було розповсюдити на всі подібні йому процеси, необхідно навести їх у критеріях (числах) подібності, які характеризують вільну конвекцію. Тоді рівняння буде мати вигляд:

$$Nu = C(Gr Pr)^n, \quad (7.13)$$

де C, n – дослідні коефіцієнти.

Узагальнена залежність (7.13) дозволяє встановити, як впливає на коефіцієнт тепловіддачі такі величини, як геометричний розмір системи l , коефіцієнт в’язкості ν середовища і та ін., які в досліді не вимірювалися. В результаті відпадає необхідність у проведенні додаткових вимірювань.

Тепловіддачу при вільному русі рідини у великому об’ємі можна розрахувати за таким рівнянням:

для горизонтальних труб при $10^3 < Gr Pr < 10^9$

$$Nu_{pi\partial} = 0.5(Gr_{pi\partial} Pr_{pi\partial})^{0.25} \left(\frac{Pr_{pi\partial}}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}, \quad (7.14)$$

для вертикальних труб і плит при $10^3 < Gr Pr < 10^9$

$$Nu_{pid} = 0.5 (Gr_{pid} Pr_{pid})^{0.25} \left(\frac{Pr_{pid}}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}, \quad (7.15)$$

при $Gr \cdot Pr > 6 \cdot 10^{10}$

$$Nu_{pid} = 0.5 (Gr_{pid} Pr_{pid})^{0.33} \left(\frac{Pr_{pid}}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}, \quad (7.16)$$

В цих рівняннях за визначальну температуру приймається температура рідини віддалік від поверхні, індекси "pid" і "cm" означають, що числа подібності визначаються відповідно при визначальній температурі рідини t_{pid} і температурі поверхні t_{cm} .

Для газів $Pr = const$, а $\frac{Pr_{pid}}{Pr_{cm}} = 1$ і тому всі приведені вище формули зводяться.

В загальному випадку для тіл будь-якої форми і розміру, розташованих горизонтально і вертикально, для крапельних рідин і газів може бути використана формула А.А. Міхєєва:

$$Nu = C (Gr_c Pr_c)^n, \quad (7.17)$$

Значення коефіцієнтів C і n наведені в табл. 2.1:

Таблиця 7.1 - Значення сталих C і n

$(Gr_c \cdot Pr_c \cdot c)$	C	n
$0 \dots 1 \cdot 10^{-3}$	0.5	0
$1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1.18	1/8
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0.54	1/4
$2 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^{13}$	0.135	1/3

Фізичні константи λ , ν , Pr для повітря, що входять у склад чисел подібності, визначають по середній температурі граничного шару (табл. 7.2):

$$t_c = 0.5(t_{cm} + t_{pid}).$$

Таблиця 7.2 - Фізичні властивості сухого повітря при $B = 760$ мм рт. ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho,$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$C_p,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\alpha \cdot 10^6,$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^6,$ $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$	$\nu \cdot 10^6,$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
---------------------	---	---	---	---	---	--	------

1	2	3	4	5	6	7	8
-50	1.584	1.013	2.04	12.7	14.6	9.23	0.728
-40	1.515	1.013	2.12	13.8	15.2	10.04	0.728
-30	1.453	1.013	2.20	14.9	15.7	10.80	0.728
-20	1.395	1.009	2.28	16.2	16.2	12.7	0.716
-10	1.342	1.009	2.36	17.4	16.7	12.43	0.712
0	1.293	1.005	2.44	18.8	17.2	13.28	0.707
10	1.274	1.005	2.51	20.0	17.6	14.16	0.705
20	1.205	1.005	2.59	21.4	18.1	15.06	0.703
30	1.165	1.005	2.67	22.9	18.6	16.00	0.701
40	1.128	1.005	2.76	24.3	19.1	16.96	0.699
50	1.093	1.009	2.83	25.7	19.6	17.95	0.698
60	1.060	1.009	2.90	27.2	20.1	18.97	0.696
70	1.029	1.009	2.96	28.6	20.6	20.02	0.694
80	1.000	1.009	3.05	30.2	21.1	21.09	0.692
90	0.972	1.009	3.13	31.9	21.5	22.10	0.690
100	0.946	1.009	3.21	33.6	21.0	23.13	0.688
120	0.898	1.009	3.34	36.8	22.8	25.45	0.686
140	0.858	1.013	3.49	40.3	23.7	27.80	0.684
160	0.815	1.017	3.64	43.9	24.5	30.09	0.682
180	0.779	1.022	3.78	47.5	25.3	32.49	0.681
200	0.746	1.026	3.93	51.4	26.0	34.85	0.680
250	0.674	1.088	4.27	61.0	27.4	40.61	0.677
300	0.615	1.047	4.60	71.6	29.7	48.33	0.674
350	0.566	1.059	4.19	81.9	31.4	55.46	0.676
400	0.524	1.068	5.21	93.1	33.0	63.09	0.678

7.2. Лабораторна установка

Досліди по визначенню коефіцієнта тепловіддачі при вільній конвекції проводяться на лабораторній установці (рис.7.1), яка складається з циліндричної труби $\varnothing 80$ мм і довжиною 630 мм. У середині труби встановлено електричний нагрівач 2, потужність якого регулюється ЛАТРом 8. Споживана потужність визначається за допомогою показань амперметра 10 і вольтметра 9. З обох кінців труба закрита дисками 3, які виготовлені з теплоізоляційного матеріалу і призначені для зменшення теплових втрат крізь торці. Температура на поверхні труби вимірюється термопарами 5, холодні спаї яких виведені у коробку 4. Термопари через перемикач 6 підключені до потенціометра 7, який вимірює термоЕРС, з якої за допомогою таблиці визначається температура. Досліди можуть проводитись на двох установках, на одній з яких труба горизонтальна, а на другій – вертикальна.

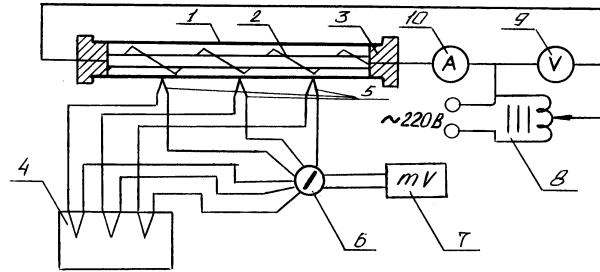


Рис . 7.1 Схема установки для дослідження теплообміну при природній конвекції

7.3. Порядок проведення роботи

Обмеженість часу при проведенні лабораторного заняття не дозволяє провести експерименти, які встановлюють залежність (7.8) Тому планом занять передбачається проведення одного–двох дослідів по визначенню коефіцієнта тепловіддачі. Потім для умов з урахуванням конкретних чинників в експерименті (температура, розташування труби, навколишнє середовище – повітря, геометричні розміри труби) обчислюють коефіцієнт тепловіддачі за критеріальним рівнянням і порівнюють з експериментальним.

Послідовність проведення роботи

1. Ввімкнути установку і за допомогою ЛАТРа встановити режим нагрівання.
2. Домогтися стаціонарного стану тепловіддачі, який характеризується сталими за часом показаннями термопар. До вимірювань температури можна приступити через 20–40 хвилин після ввімкнення установки. Необхідно пам'ятати, що, чим більша сила струму і більше його напруга, тим більший час потрібен для досягнення стаціонарного режиму.
3. Записати показання амперметра, вольтметра і виміряти термоЕРС усіх термопар. Для контролю необхідно повторити запис показань приладів декілька разів з інтервалом 5–10 хвилин.
4. Змінити температурний режим. Для цього зменшити або збільшити витрату електроенергії.
5. Досліди проводяться при умові, що режим руху повітря біля стінок труби сталий, тому їх слід проводити при закритих дверях і вікнах і відсутності руху повітря в лабораторії.
6. Після закінчення дослідів вимкнути установку із мережі.

Результати вимірювань заносяться у протокол.

Протокол вимірювань

Пара-метр	Поз-начен-ня	Од. вимі-рюв.	І дослід			ІІ дослід		
			Вимірювання					
			1	2	3	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сила струму	I	A						

Напруга	U	B						
ТермоЕРС	E	MB						
Термопара 1								
Термопара 2								
Термопара 3								
Температура навколишнього середовища	t_{pid}	°C						

7.4. Обробка результатів вимірювань

1. Обчислити для кожного досліду середні значення термоЕРС:

$$E = \frac{(E_1 + E_2 + E_3)}{n}, \quad (7.18)$$

де n – число вимірювань.

2. Обчислити по таблиці значення температур.

3. Розрахувати загальну електричну потужність, яка дорівнює тепловому потоку:

$$Q = IU \cos \varphi. \quad (7.19)$$

4. Розрахувати променевий тепловий потік за формулою (7.4).

5. Визначити конвективний тепловий потік за формулою (7.3).

6. Розрахувати α_k за формулою (7.2).

7. Для порівняння розрахувати α критеріальним методом, для чого

- по визначальній температурі з табл. 7.2 знайти значення фізичних параметрів повітря (λ , ν , Pr);
- обчислити критерій Грасгофа і добуток $GrPr$;
- вибрати одну із розрахункових формул (7.12) – (7.15) з урахуванням визначальної температури і добутку $GrPr$;
- розрахувати критерій Нуссельта і за формулою цього критерія – коефіцієнт тепловіддачі α_k ;
- порівняти розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі з дослідним. Розбіжність не повинна перевищувати $\pm 25\%$.

Контрольні запитання:

1. Що називається конвективним теплообміном?
2. Як розрізняють види конвекції?
3. Які Ви знаєте режими руху рідини і які їхні відмінності?
4. Дайте визначення і характеристику гідродинамічного і теплового пограничних шарів.
5. Який механізм передачі теплоти при ламінарному і турбулентному русі рідини?

6. Напишіть рівняння закону тепловіддачі.
7. Дайте визначення коефіцієнта тепловіддачі. Від чого він залежить?
8. Чому для визначення коефіцієнта тепловіддачі застосовують теорію подібності?
9. Яке рівняння називається рівнянням подібності при конвективному теплообміні?
10. Як записується в загальному вигляді рівняння конвективної тепловіддачі при природній конвекції у критеріальній формі?
11. Запишіть формули чисел подібності, які характеризують конвективний теплообмін і поясніть фізичний зміст цих чисел.
12. Запишіть рівняння закону Стефана–Больцмана для сірого тіла.
13. Яке тіло називають абсолютно чорним і що таке ступінь чорноти сірого тіла?

Завдання для самостійної роботи

Задача 7.1. Тепловий потік від пари, що конденсується у конденсаторі, до стінки трубки дорівнює q при температурі пари t . Визначити температуру на поверхні трубки конденсатора, прийнявши $\alpha = 8000 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$. Вихідні дані в табл. 7.3

Протокол обчислень

Параметр	Позначення	Один. вимірюв.	Формула	Дослід		
				1	2	3
1	2	3	4	5	6	7
Сила струму	I	А				
Напруга	U	В				
$\cos\varphi$	—	0.90...0.95				
Загальна потужність теплового потоку	Q	Вт	(7.19)			
Ступінь чорноти	ε	—				
Площа поверхні труби	f	м ²				
Середня термоЕРС	E_{cp}	мВ	(2.18)			
Температура поверхні	t_{cm}	°С	табл. 1.2			
Потужність променистого потоку	Q_{np}	Вт	(2.4)			
Потужність конвективного потоку	Q_k	Вт	(2.3)			
Дослідний коефіцієнт тепловіддачі	α_k	Вт/(м ² К)	(2.2)			
Визначальна температура	t_{pid}					
		t_{cm}				
Коефіцієнт теплопровідності	λ	Вт/(м К)	таб 2			

Коефіцієнт кінема- тичної в'язкості	ν	$\text{м}^2/\text{с}$	
Критерій Прандтля	Pr		
Критерій Грасгофа	Gr		(2.8)
Добуток	$GrPr$		
Коефіцієнти:			
	C		(2.14) – (2.16)
		n	або табл. 2.1
Критерій Нуссельта	Nu		(2.13)
Розрахунковий кое- фіцієнт тепловіддачі	$\alpha_{кр}$	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$	(2.11)
Розходження	$\Delta = \frac{\alpha_{\kappa} - \alpha_{кр}}{\alpha_{\kappa}} \cdot 100\% < 25\%$		

Таблиця 7.3

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$q, \text{кВт}/\text{м}^2$	100	105	110	115	120	125	130	135	140	95	100	105	110	115	120
$t, ^\circ\text{C}$	40	45	50	55	60	65	70	40	45	50	55	60	65	70	75

Задача 7.2 Трубка, яка розташована вертикально з зовнішнім діаметром і довжиною $l > 50d$ омивається водою з швидкістю w . Температура поверхні трубки $t_{\text{ст}}$, середня температура води в трубці $t_{\text{рід}}$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від стінки трубки до води і середню по довжині трубки густину теплового потоку. Вихідні дані знаходяться в табл. 7.4.

Таблиця 7.4

Параметр	Варіант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$d, \text{мм}$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$w, \text{м}/\text{с}$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4
$t_{\text{с}}, ^\circ\text{C}$	70	75	80	85	90	95	60	65	70	75	80	85	90	95	80
$t_{\text{жс}}, ^\circ\text{C}$	20	25	30	35	40	45	20	25	30	35	40	45	30	35	40

Задача 7.3 У каналі прямокутного перерізу 30х10 см рухається повітря, нагріваючись від t' до t'' . Визначити питомий тепловий потік, якщо розрахункова витрата повітря V , а середня температура стінки каналу t_{cm} . Вихідні дані в табл. 2.5.

Таблиця 7.5

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t' , °C	25	30	35	40	45	50	55	25	30	35
t'' , °C	110	115	120	125	130	140	145	150	155	160
V , м³/с	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	0.5	0.6
t_c , °C	140	130	150	145	165	160	155	165	180	185

Список літератури:

1. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1975.
2. Теплотехника /Под ред. А.П.Баскакова./ -М.: Энергоатомизд., 1982.
3. Теплотехника /Под ред. В.И.Крутова./-М.: Машиностроение., 1986.
4. Швец И.Т. и др..Теплотехника.-К.: Высшая школа, 1976.

Додаток 1. Середня мольна теплоємність при сталому тиску (по спектроскопічним даним)

t, °C	μC_p , кДж/(кмоль•К)						
	H ₂	N ₂	O ₂	Повітря сухе	CO ₂	H ₂ O	CO
0	28,62	29,12	29,27	29,07	35,86	33,50	29,12
100	28,93	29,14	29,54	29,15	38,11	33,74	29,18
200	29,07	29,23	29,93	29,30	40,06	34,12	29,30
300	29,12	29,38	30,40	29,52	41,76	34,58	29,52
400	29,18	29,60	30,88	29,79	43,25	35,09	29,79
500	29,25	29,86	31,33	30,10	44,57	35,63	30,10
600	29,32	30,15	31,76	30,41	45,75	36,20	30,42
700	29,41	30,45	32,15	30,72	46,81	36,79	30,75
800	29,52	30,75	32,50	31,03	47,76	37,39	31,07
900	29,65	31,04	32,83	31,32	48,62	38,01	31,38
1000	29,79	31,31	33,12	31,60	49,40	38,62	31,67
1100	29,94	31,58	33,39	31,86	50,10	39,23	31,94
1200	30,11	31,83	33,63	32,11	50,74	39,83	32,19

Додаток 2. Суха насичена пара і вода на кривій насичення (по тискам)

P, Мпа	t _н , °C	v' , м³/кг	v'' , м³/кг	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	s' , кДж/(кг•К)	s'' , кДж/(кг•К)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
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
0,0140	52,57	0,0010132	10,69	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	8,0305
0,0180	57,82	0,0010159	8,448	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445
0,0200	60,08	0,0010171	7,652	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,0400	75,87	0,0010264	3,999	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,0600	85,94	0,0010330	2,734	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,0800	93,50	0,0010385	2,089	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	179,88	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	6,8411
3,0	233,87	0,0012164	0,06663	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	0,0013119	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	0,00751	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 3. Насичена пара і вода на лінії насичення (по температурам)

t, °C	P, МПа	v' , м³/кг	v'' , м³/кг	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	s' , кДж/(кг•K)	s'' , кДж/(кг•K)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	8,9009
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	0,047359	0,0010292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135
90	0,070108	0,00110361	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
1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	0,00115665	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	0,00114041	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	0,00697	1763,1	2485,7	722,6	3,9189	5,0603
374	22,084	0,002834	0,00348	2039,2	2150,7	111,5	4,3374	4,5096

Примітка. Параметри критичного стану: тиск 22,115 МПа, температура 374,12°C , питомий об'єм 0,003147м³/кг.

Додаток 4. Питомі об'єми і ентальпії перегрітої водяної пари при різних тисках

t, °C	1,2 МПа		1,4 МПа		1,6 МПа		1,8 МПа	
	ν , м³/кг	h , кДж/кг	ν , м³/кг	h , кДж/кг	ν , м³/кг	h , кДж/кг	ν , м³/кг	h , кДж/кг
240	0,188	0,188	0,160	2904	0,138	2895		
250	0,192	0,192	0,164	2928	0,142	2919	0,125	2911
280	0,205	0,205	0,175	2996	0,152	2990	0,134	2983
290	0,210	0,210	0,179	3019	0,155	3013	0,137	3007
300	0,214	0,214	0,182	3041	0,159	3035	0,140	3030
310							0,143	3052
320							0,146	3075
330							0,149	3097
340							0,152	3119
350							0,155	3141
360							0,157	3164
380							0,163	3208
390							0,166	3230
400							0,168	3251
t, °C	3,0 МПа		3,2 МПа		3,4 МПа			
	ν , м³/кг	h , кДж/кг	ν , м³/кг	h , кДж/кг	ν , м³/кг	h , кДж/кг		
280	0,0772	2942	0,0718	2934	0,0670	2972		
300	0,0812	2994	0,0756	2986	0,0707	2982		
310	0,0831	3019	0,0775	3014	0,0725	3008		
320	0,0850	3044	0,0793	3033	0,0610	3016		
330	0,0869	3068	0,0810	3063	0,0759	3058		
340	0,0887	3092	0,0828	3087	0,0776	3083		
350	0,0905	3116	0,0845	3111	0,0792	3107		
360	0,0923	3139	0,0862	3135	0,0808	3131		

370	0,0941	3163	0,0879	3159	0,0824	3155
380	0,0959	3186	0,0896	3182	0,0840	3178
390	0,0976	3209	0,0912	3205	0,0856	3202
400	0,0993	3232	0,0929	3228	0,0871	3225
420	0,1030	3277	0,0961	3274	0,0902	3271
440	0,1060	3329	0,0993	3319	0,0932	3316
t, °C	2,0 МПа		2,2 МПа		2,4 МПа	
	ν , м³/кг	h , кДж/кг	ν , м³/кг	h , кДж/кг	ν , м³/кг	h , кДж/кг
250	0,112	2903	0,100	2894	0,091	2885
280	0,120	2977	0,108	2970	0,098	2963
290	0,123	3001	0,111	2994	0,101	2988
300	0,126	3024	0,113	3018	0,103	3012
310	0,128	3047	0,116	3042	0,106	3036
320	0,131	3070	0,118	3065	0,108	3060
330	0,133	3092	0,121	3088	0,110	3083
340	0,136	3115	0,123	3110	0,112	3006
350	0,137	3137	0,126	3133	0,115	3129
360	0,141	3160	0,128	3156	0,117	3152
380	0,146	3204	0,133	3200	0,121	3197
390	0,149	3226	0,135	3223	0,123	3219
400	0,151	3248	0,137	3245	0,125	3242
t, °C	4,0 МПа		4,2 МПа		4,4 МПа	
	ν , м³/кг	h , кДж/кг	ν , м³/кг	h , кДж/кг	ν , м³/кг	h , кДж/кг
1	2	3	4	5	6	7
300	0,0589	2962	0,0557	2955	0,0527	2946
310	0,0605	2990	0,0572	2983	0,0542	2977
1	2	3	4	5	6	7
320	0,0587	3010	0,0557	3010	0,0557	3005
330	0,0635	3042	0,0601	3037	0,0571	3032
340	0,0650	3068	0,0616	3063	0,0585	3058
350	0,0665	3093	0,0630	3088	0,0597	3084
360	0,0679	3118	0,0644	3114	0,0612	3109
370	0,0693	3143	0,0657	3139	0,0625	3134
380	0,0707	3167	0,0671	3163	0,0638	3159
390	0,0720	3191	0,0684	3187	0,0651	3184
400	0,0734	3215	0,0699	3211	0,0663	3208

420	0,0761	3261	0,0722	3258	0,0688	3255
440	0,0787	3308	0,0748	3305	0,0712	3302
460	0,0813	3354	0,0733	3351	0,0736	3348

Додаток 5. Фізичні параметри для сухого повітря (при тиску 101325 Н/м²)

t, °C	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кмоль•К)	λ , Вт/(м•К)	$\alpha \cdot 10^{-6}$, м ² /с	$\mu \cdot 10^{-6}$, Н•с/м ²	$\nu \cdot 10^{-6}$, м ² /с	Pr
1	2	3	4	5	6	7	8
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	11,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
1	2	3	4	5	6	7	8
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677

Додаток 6. Фізичні параметри води на лінії насичення

t, °C	P, Па	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кмоль•К)	λ , Вт/(м•К)	α , 10 ⁻⁶ м ² /с	μ , 10 ⁻⁶ Н•с/м ²	ν , 10 ⁻⁶ м ² /с	1/K	Pr
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1,013	999,9	4,212	0,560	13,2	1788	1,789	-0,63	13,5
10	1,013	999,7	4,191	0,580	13,8	1306	1,306	+0,7	9,45
20	1,013	998,2	4,183	0,597	14,3	1004	1,006	1,82	7,03
30	1,013	995,7	4,174	0,612	14,7	801,5	0,805	3,21	5,45
40	1,013	992,2	4,174	0,627	15,1	653,3	0,659	3,87	4,36
50	1,013	988,1	4,174	0,640	15,5	549,4	0,556	4,49	3,59
60	1,013	983,1	4,179	0,650	15,8	469,9	0,478	5,11	3,03
70	1,013	977,8	4,187	0,662	16,1	406,1	0,415	5,70	5,28
80	1,013	971,8	4,195	0,669	16,3	355,1	0,365	6,32	2,23
90	1,013	965,3	4,208	0,676	16,5	314,9	0,326	6,95	1,97
100	1,013	958,4	4,220	0,684	16,8	282,5	0,295	7,52	1,75
110	1,43	951,0	4,233	0,685	17,0	259,0	0,272	8,08	1,60
120	1,98	943,1	4,250	0,686	17,1	237,4	0,252	8,64	1,47
130	2,70	934,8	4,266	0,686	17,3	217,8	0,233	9,19	1,35
140	3,61	926,1	4,287	0,685	17,2	201,1	0,217	9,72	1,26
150	4,76	917,0	4,313	0,684	17,3	186,4	0,203	10,3	1,17
160	6,18	907,4	4,346	0,681	17,8	173,6	0,191	10,7	1,10
170	7,92	897,2	4,380	0,676	17,2	162,8	0,181	11,3	1,05
180	10,03	886,9	4,417	0,672	17,2	153,0	0,173	11,9	1,03
190	12,55	876,0	4,459	0,664	17,2	144,2	0,165	12,6	0,965

200	15,55	863,0	4,505	0,658	17,0	136,4	0,158	13,3	0,932
210	19,08	852,8	4,555	0,649	16,7	130,5	0,153	14,1	0,915
220	23,20	840,3	4,614	0,640	16,5	124,6	0,148	14,8	0,898
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
230	27,98	827,3	4,681	0,629	16,3	119,7	0,145	15,9	0,888
240	33,48	813,6	4,760	0,617	16,0	114,8	0,141	16,8	0,883
250	39,78	799,0	4,870	0,605	15,5	109,0	0,137	18,1	0,884

ЗМІСТ

Лабораторна робота №1.....	5
Лабораторна робота №2.....	16
Лабораторна робота №3.....	32
Лабораторна робота №4.....	38
Лабораторна робота №5.....	46
Лабораторна робота №6.....	52
Лабораторна робота №7.....	64
Список літератури.....	70
Додатки.....	71