

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ І ТРАНСПОРТУ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ТА ЗАОЧНОЇ ФОРМ НАВЧАННЯ
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ
133 – ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ
ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «БАКАЛАВР»
(У ТОМУ ЧИСЛІ СКОРОЧЕНИЙ ТЕРМІН НАВЧАННЯ)

КРЕМЕНЧУК 2018

Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Теоретичні основи теплотехніки» для студентів денної та заочної форм навчання зі спеціальності 133 – Галузеве машинобудування освітнього ступеня «бакалавр» (у тому числі скорочений термін навчання)

Укладач к. т. н., доц. Е. С. Клімов

Рецензент к. т. н., доц. С. М. Черненко

Кафедра автомобілів і тракторів

Затверджено методичною радою Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Протокол №__ від “__” _____ 20__ р.

Голова методичної ради _____ проф. В. В. Костін

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Перелік лабораторних робіт	6
Лабораторна робота № 1 Визначення теплового стану робочого тіла....	6
Лабораторна робота № 2 Визначення ізобарної теплоємності повітря ...	19
Лабораторна робота № 3 Визначення параметрів вологого повітря.....	26
Лабораторна робота № 4 Дослідження процесу стиснення газу в поршневному компресорі.....	
Лабораторна робота № 5 Визначення коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів методом циліндра.....	32
Лабораторна робота № 6 Визначення коефіцієнта тепловіддачі горизонтального циліндра під час вільної конвекції.....	39
2 Критерії оцінювання знань студента під час виконання лабораторних робіт.....	53
Список літератури.....	54
Додаток А Зразок оформлення титульної сторінки.....	55
Додаток Б Довідкові таблиці.....	56

ВСТУП

Лабораторні роботи є важливим видом занять для засвоєння студентами знань і набуття вмінь з навчальної дисципліни «Теоретичні основи теплотехніки». Лабораторні роботи проводять після вивчення відповідних тем теоретичного матеріалу на лекційних заняттях.

Перелік лабораторних робіт та їх обсяг визначається робочою навчальною програмою дисципліни, а термін проведення робіт – розкладом навчальних занять.

Метою проведення лабораторних робіт є закріплення знань, отриманих на лекціях та під час самостійного вивчення дисципліни, набуття вмінь експериментального дослідження термодинамічних процесів, а також процесів тепло- і масообміну; ознайомлення з обладнанням, що застосовується під час проведення лабораторних досліджень.

Під час підготовки до виконання лабораторних робіт студент повинен:

- 1) вивчити матеріал з теми лабораторної роботи, що виконується;
- 2) засвоїти методику виконання лабораторної роботи й обробки результатів експерименту;
- 3) ознайомитися з обладнанням для проведення лабораторної роботи і засобами вимірів;
- 4) підготувати бланк звіту для проведення лабораторної роботи;
- 5) знати відповіді на контрольні питання до лабораторної роботи.

Звіт з лабораторних робіт оформлюють на папері форматом А4 відповідно до вимог для оформлення текстових документів.

Звіт уміщує: назву лабораторної роботи, тему роботи, схему лабораторної установки, що використовується під час проведення роботи, методику проведення досліджень, результати досліджень (таблиці, графіки тощо), висновки щодо отриманих результатів.

До проведення лабораторних робіт студент повинен пройти інструктаж з техніки безпеки та дотримуватись вимог цих правил для запобігання травматизму й пошкодженню лабораторного обладнання.

До виконання лабораторних робіт допускаються студенти, які теоретично підготовлені з теми лабораторної роботи і мають бланк звіту.

Безпосередньо в лабораторії студенти знайомляться з обладнанням, що використовується під час виконання лабораторної роботи, і засобами вимірів для експериментального визначення параметрів. Студенти проводять експерименти в обсязі й у порядку, визначеному в методичних указівках щодо лабораторної роботи.

Результати вимірів заносять до звіту, проводять необхідні розрахунки. Оформлений звіт подають викладачеві на перевірку. Під час захисту лабораторних робіт студент повинен знати відповіді на всі контрольні питання до лабораторних робіт.

Звіти з проведених лабораторних робіт підшиваються разом і формують «Журнал лабораторних робіт», який повинен мати титульну сторінку, зразок оформлення якої наведено в додатку А.

1 ПЕРЕЛІК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Лабораторна робота № 1

Тема. Визначення теплового стану робочого тіла

Мета: ознайомлення з методами вимірювань температур у рідких, парових і газоподібних середовищах, що використовуються у теплотехнічних процесах. Набуття навичок експериментального визначення температури робочого тіла за допомогою термоелектричного термометра (термопари) й оцінювання похибки вимірювань.

Короткі теоретичні відомості

Температурою, що характеризує тепловий стан тіла, називають умовну статистичну величину, прямо пропорційну середній кінетичній енергії поступального руху його молекул.

Якщо два тіла з різними середніми кінетичними енергіями руху молекул привести до зіткнення, то буде проходити процес вирівнювання кінетичних енергій молекул обох тіл. Цей процес буде проходити доти, поки температури тіл не зрівняються. Такий стан двох тіл називається тепловою рівновагою.

У разі температури абсолютного нуля ($T = 0$) припиняється тепловий поступальний рух молекул. Ця гранична мінімальна температура і є початком для відліку абсолютних температур.

В абсолютній шкалі для температури потрійної точки води, тобто точки, де рідка, пароподібна і тверда фази знаходяться в стійкій рівновазі, температура в градусах Кельвіна дорівнює 273,16 К (точно), а в градусах Цельсія – 0,01 °С.

Отже, між температурами, виміряними за шкалою Кельвіна (К) і за шкалою Цельсія (°С), існує зв'язок, який описується такою залежністю:

$$T = 273,15 + t.$$

Температура не піддається безпосередньому вимірюванню. Тому стан теплової рівноваги та значення температури робочого тіла визначають за зміною

фізичних властивостей деяких додаткових тіл, які уміщають до вимірюваного середовища. Існують різні прилади для вимірювання температури тіл. Найбільш розповсюдженими є:

- термометри розширення;
- термометри манометричні;
- термоелектричні термометри;
- електричні термометри опору;
- пірометри, що вимірюють температури тіл за їхнім випромінюванням.

Термометром називають прилад, що слугує для вимірювання температури шляхом перетворення її на сигнал, що є відомою функцією температури.

Практичні межі застосування найбільш розповсюджених приладів для вимірювання температур різних тіл наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Термометри для промислового вимірювання температур тіл

Термометрична властивість	Найменування приладу	Межі тривалого застосування, °C	
		нижня	верхня
Теплове розширення	Рідинні скляні термометри	-190	600
Зміна тиску	Манометричні термометри	-160	600
Зміна електричного опору	Електричні термометри опору	-200	500
	Напівпровідникові термометри опору (термістори, терморезистори)	-90	180
Термоелектричні ефекти (термо-е.р.с.)	Термоелектричні термометри (термопари) стандартизовані.	-50	1600
	Термоелектричні термометри (термопари) спеціальні	1300	2500
Теплове випромінювання	Оптичні пірометри	700	2500
	Радіаційні пірометри	20	6000
	Фотоелектричні пірометри	600	4000
	Колірні пірометри	1400	2800

Чутливим елементом термометра називають частину термометра, яка перетворює теплову енергію на інший вид енергії, що дозволяє одержати інформацію про температуру.

Розрізняють термометри контактні й безконтактні. Чутливий елемент контактного термометра безпосередньо контактує з вимірюваним середовищем.

Термоелектричний метод вимірювання температури полягає у виникненні електрорушійної сили (е. р. с.) у контурі, що складається з різнорідних провідників, у разі порушення теплової рівноваги, тобто під час нерівності температур у місцях з'єднання провідників.

Ланцюг, складений із двох різнорідних провідників (термоелектродів), називається термопарою. На рис. 1.1 наведено схему вимірювання термо-е.р.с. термопари.

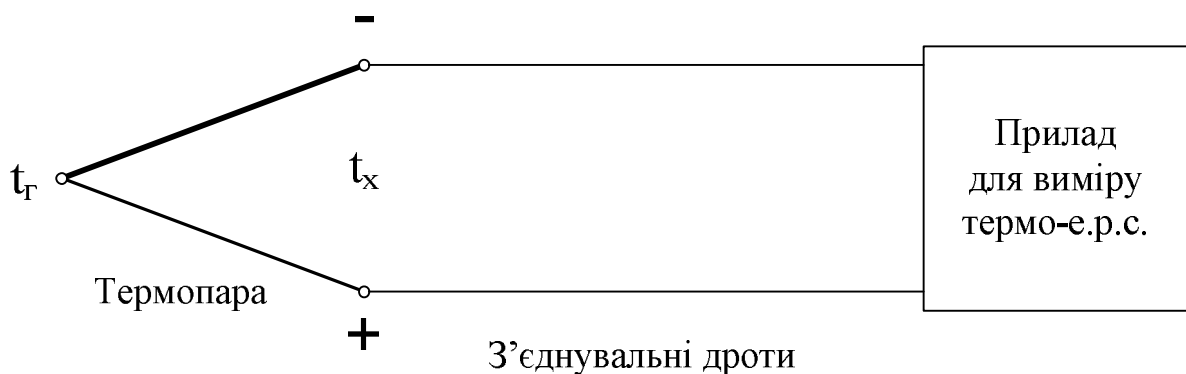


Рисунок 1.1 – Схема вимірювання термо-е. р. с. термопари

Якщо температури t_r і t_x з'єднань (спаїв) провідів неоднакові, то виникає термо-е. р. с., і по колу тече струм. Величина термо-е. р. с. тим більша, чим більша різниця температур (t_r і t_x). При цьому температура в проміжних точках провідів не чинить впливу на величину е. р. с., якщо провідники досить однорідні. За величиною термо-е. р. с. судять про різницю температур спаїв.

Для утворення термопари підбирають два матеріали, що мають певні термоелектричні властивості. Стандартні технічні термопари наведено в табл. 1.2.

Найбільшу термо-е.р.с. за однакових температур розвиває хромель-копелева термопара ТХК, що має позначення ХК. Відносна похибка вимірювання не перевищує 0,87 %, тому для вимірювання температур до 600 °С термопара ТХК є найбільш зручною.

Таблиця 1.2 – Стандартні технічні термопари

Позначення	Матеріали термоелектродів термопар	Межі застосування, ° С		
		Нижня	Верхня	
			трив.	корот.
ХК	Хромель-копель	-50	600	800
ХА	Хромель-алюмель	-50	1000	1300
НС	Сплави НК (нікель-кобальтовий) - СА (кремній-алюмінієвий)	300	1000	1000
ПП-1	Платинородій-платина	-20	1300	1600
ПР 30/6	Платинородій (30 % родія)-платина	300	1600	1800

Для вимірювання термо-е.р.с. використовують потенціометри з нормальними елементами.

Прилади й обладнання

Експериментальна установка складається з горизонтального циліндра (труби) з установленими на його поверхні в різних точках термопарами, універсальний вимірювальний прилад Р-4833 (надалі потенціометр переносний (ПП)), автоматичний потенціометр типу КСП-4 (АП). У середині труби розміщений електричний нагрівальний елемент, за допомогою якого труба нагрівається. Живлення нагрівача здійснюється від мережі через лабораторний автотрансформатор ЛАТР 1, що дозволяє регулювати потужність. Схему установки наведено на рис. 1.2.

Порядок виконання роботи

1. Виміряти термо-е. р. с. у зазначених точках вимірювання та занести їх значення E_1, E_2, E_3, E_4 до протоколу вимірювань (табл. 1.3).

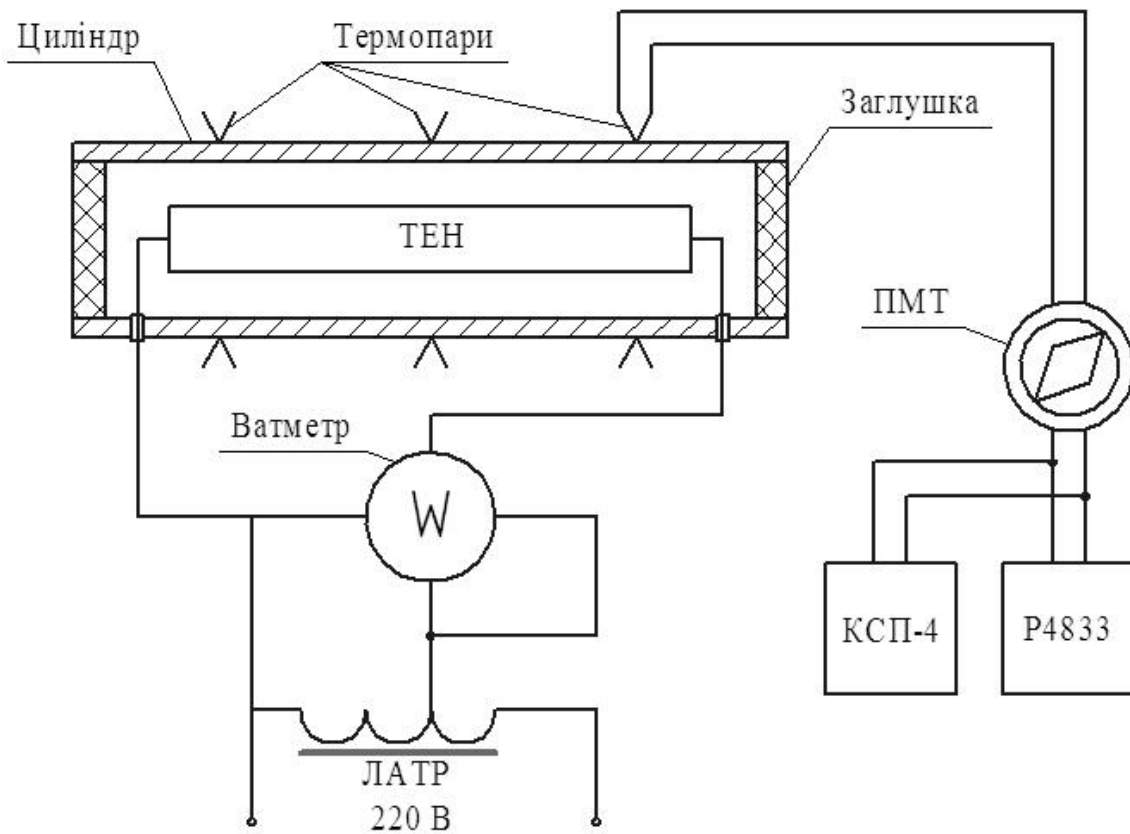


Рисунок 1.2 – Схема експериментальної установки

Таблиця 1.3 – Протокол вимірювань

Температура в приміщенні t_a °С . Атмосферний тиск $B =$ мм рт. ст.

Номер точки виміру	Термо-е. р. с. E , мВ	Різниця температур $t_{mn} = t_2 - t_x$, °С	Температура стінки, °С		Різниця вимірів $ \Delta t_0 $, °С
			ПП	АП	
Точка 1					
Точка 2					
Точка 3					
Точка 4					

2. За градууювальною таблицею стандартної термопары ТХК (табл. Б.1) визначити різницю температур між гарячим і холодним спаями t_{mn} для зазначених точок вимірювання температур.

3. За величиною $t_{mn} = t_2 - t_x$ обчислити значення температури стінки циліндра. Оскільки $t_x = t_a$ (t_a – температура навколишнього середовища), то:

$$t_c = t_a - t_{mn} \quad (1.1)$$

Результати занести до графі ПП протоколу для відповідних точок вимірювання.

4. Для цих самих точок зняти показання температур автоматичним потенціометром КСП-4 і занести до графі АП протоколу.

5. Обчислити різницю між значеннями температур, визначених приладами ПП і АП. Результати занести до протоколу вимірів.

6. Оцінити похибку вимірювання за такою методикою.

6.1 Визначити похибку вимірювання термopарою за виразом:

$$\Delta t_{mn} = \varepsilon_{mn} t_{mn}, \quad (1.2)$$

де ε_{mn} – відносна похибка термopари ($\varepsilon_{mn} \leq 0,0087$ для стандартної термopари).

6.2 Визначити похибку вимірювань АП (КСП-4) за виразом

$$\Delta t_{an} = \Delta t_{mn} + \varepsilon_{an} t_{\max \text{ шк}} + \Delta t_{omc}, \quad (1.3)$$

де ε_{an} – відносна похибка приладу (зазначена на шкалі приладу у %); $t_{\max \text{ шк}}$ – максимальне значення шкали приладу; Δt_{omc} – похибка зчитування даних із приладу (дорівнює половині ціни поділки шкали приладу).

6.3 Визначити похибку вимірювань температури переносним потенціометром Р-4833 за формулою:

$$\Delta t_{nn} = \Delta t_{mn} + \Delta t'_{nn} + \Delta t_{pm}, \quad (1.4)$$

де Δt_{pm} – похибка вимірювань температури навколишнього середовища за допомогою ртутного стовпчика (дорівнює половині ціни поділки шкали приладу); Δt_{mn} – похибка вимірювання температури термopарою; $\Delta t'_{nn}$ – похибка, що внесена переносним потенціометром у результаті вимірювань температури. Величина $\Delta t'_{nn} = f(\Delta E)$. Відповідно до інструкції з експлуатації універсального вимірювального переносного потенціометра Р-4833 основна похибка при вимірюванні термо-е. р. с. не перевищує величини ΔE , яку визначають так:

$$\Delta E \leq \pm 5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{E_n}{10} + E \right), \quad (1.5)$$

де E_n – значення, що нормується, В ($E_n = 0,1 \text{ В}$); E – показники потенціометра у В за нормальних умов вимірювань (температура навколишнього повітря

(20±2) °С; відносна вологість 25 – 80 %; атмосферний тиск 84 – 106,7 кПа чи 630 – 800 мм Нg).

Визначивши значення основної похибки термо-е. р. с. ΔE та використовуючи градууювальну таблицю (табл. Б.1) для термопар ТХК, необхідно визначити похибку вимірювань температури $\Delta t'_{mn}$ і підставити до формули (1.4) сумарну похибку переносного потенціометра.

6.4 Визначити максимально можливе відхилення показань температур, визначених автоматичним і переносним потенціометрами за виразом:

$$\Delta t_p = \Delta t_{an} + \Delta t_{mn}. \quad (1.6)$$

6.5 Зіставити відхилення температур, отриманих при вимірах Δt_0 і розрахункове значення Δt_p , після чого дати висновок про достовірність вимірювань приладами АП і ПП.

Контрольні питання

1. Що називається температурою робочого тіла?
2. Який стан робочого тіла називають тепловою рівновагою?
3. Указати постійні первинні точки МПТШ (Міжнародної практичної температурної шкали) і МТШ (Міжнародної температурної шкали).
4. Який прилад називають термометром?
5. Яка частина термометра називається чутливим елементом?
6. Яку властивість тіл використовують у термометрах розширення?
7. Назвати діапазони вимірювань промислових термометрів.
8. Джерела помилок під час вимірювання температур термометрами розширення.
9. Що називається термопарою?
10. Які матеріали використовуються для термопар?
11. Яким чином вимірюється температура тіл з використанням термопар?
12. Коли для вимірювання температури застосовують безконтактні термометри?

Література: [1, с. 8...15].

Лабораторна робота № 2

Тема. Визначення ізобарної теплоємності повітря

Мета: поглиблення та закріплення теорії теплоємності речовини. Ознайомлення з методом проведення калориметричного експерименту. Вимірювання середньої ізобарної теплоємності повітря в інтервалі зміни температури від кімнатної до 40 – 50 °С методом потоку.

Короткі теоретичні відомості

Теплообмін речовини із зовнішнім середовищем визначають її теплоємністю, що є однією з основних теплових характеристик тіл.

Границю відношення кількості тепла ΔQ , що підводиться, до зміни температури тіла ΔT , називають істинною теплоємністю тіла за даної температури.

$$C_x = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_x = \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_x. \quad (2.1)$$

Індек x у залежності (2.1) вказує на те, що теплоємність розглядається в процесі, у якому деякий параметр тіла x залишається незмінним. Таким параметром може бути тиск тіла, ($p = const$), його питомий об'єм ($v = const$) чи деяка функція. Теплоємність при постійному тиску називається ізобарною, а в процесі при постійному об'ємі – ізохорною.

Для кількісної міри термічної взаємодії робочого тіла з навколишнім середовищем вводять загальне поняття середньої теплоємності, що дорівнює кількості теплоти, необхідної для зміни температури тіла на один градус.

Відношення кількості тепла ΔQ , отриманого в процесі нагрівання тіла від температури t_1 до t_2 , до зміни його температури $\Delta t = t_2 - t_1$ називають повною середньою теплоємністю в інтервалі температур від t_1 до t_2

$$C_{xm} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}. \quad (2.2)$$

Зазвичай величину теплоємності відносять до одиниці кількості речовини. Залежно від вибраної одиниці вимірювань вирізняють:

– c – питому масову теплоємність, віднесену до 1 кг робочого тіла, Дж/(кг·К);

– c' – питому об'ємну теплоємність, віднесену до кількості газу, що міститься в 1 м³ об'єму за нормальних фізичних умов, Дж/(м³·К);

– μc – питому мольну теплоємність, віднесену до одного кіломоля, Дж/(кмоль·К).

Для ідеальних газів зв'язок між питомими масовими ізобарною та ізохорною теплоємностями визначається рівнянням Маєра:

$$c_p - c_v = R. \quad (2.3)$$

Газова стала R , віднесена до 1кг газу, визначається за виразом:

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{\mu}, \quad (2.4)$$

де μ – маса 1 кмоль газу в кг (чисельно дорівнює молекулярному числу газу).

В табл. 2.1 наведено значення теплоємностей найважливіших газів за нормальних фізичних умов.

Таблиця 2.1 – Параметри газів за нормальних фізичних умов

Речовина	Хім. формула	Молярн. маса, кг/кмоль	Питом. обсяг, м ³ /кг	Питома теплоємність, кДж/(кг · К)		k= c _p /c _v
				c _p	c _v	
Азот	N ₂	28,013	0,7996	1,0387	0,7419	1,400
Аміак	NH ₃	17,032	1,3152	2,0560	1,5659	1,313
Водень	H ₂	2,0159	11,112	14,189	10,065	1,410
Водяна пара	H ₂ O	18,016	1,2433	1,8606	1,3992	1,330
Повітря	–	28,970	0,7734	1,0032	0,7159	1,401
Гелій	He	4,003	5,5866	83,7267	50,4378	1,660
Двоокис вуглецю	CO ₂	44,01	0,5058	0,8150	0,6260	1,302
Кисень	O ₂	32,00	0,6998	0,9136	0,6536	1,398
Метан	CH ₄	16,032	1,3947	2,1671	1,6480	1,315
Окис вуглецю	CO	28,009	0,7998	1,0392	0,7423	1,400
Сірчистий газ	SO ₂	64,06	0,3418	0,607	0,477	1,273
Вуглекислий газ	CO ₂	44,0079	0,5090	0,8173	0,6284	1,301
Етилен	C ₂ H ₄	28,052	0,7994	1,7980	1,3938	1,300

У технічній термодинаміці велике значення має відношення теплоємності при постійному тиску до теплоємності при постійному об'ємі, що позначають буквою k (коефіцієнт Пуассона):

$$k = c_p / c_v. \quad (2.5)$$

Приблизно можна вважати, що для одноатомних газів $k = 1,67$; для двоатомних газів $k = 1,4$, а для три- і багатоатомних газів $k = 1,29$.

Для практичних розрахунків теплоємності всіх речовин зведені в таблиці, при цьому з метою скорочення об'єму таблиць середні теплоємності наведені для інтервалу температур від 0 до t , °С. У таблиці 2.2 наведені інтерполяційні формули для визначення середніх питомих масових теплоємностей деяких газів.

Таблиця 2.2 – Формули для визначення середньої питомої масової теплоємності газів в інтервалі температур 0...1500 °С

Газ	Середня питома теплоємність Дж/(кг·К)	
	Ізобарна $c_{pm} _0^t =$	Ізохорна $c_{vm} _0^t =$
O ₂	$= 0,9203 + 0,0001065 \cdot t$	$= 0,6603 + 0,0001065 \cdot t$
N ₂	$= 1,0240 + 0,00008855 \cdot t$	$= 0,7272 + 0,00008855 \cdot t$
Повітря	$= 0,9956 + 0,00009299 \cdot t$	$= 0,7088 + 0,00009299 \cdot t$
H ₂ O	$= 1,8330 + 0,0003111 \cdot t$	$= 1,3716 + 0,0003111 \cdot t$
CO ₂	$= 0,8654 + 0,0002443 \cdot t$	$= 0,6764 + 0,0002443 \cdot t$
CO	$= 1,0311 + 0,00009699 \cdot t$	$= 0,7337 + 0,00009699 \cdot t$

Прилади й обладнання

Вимірювання теплоємності газів і пари роблять у так званих проточних калориметрах (рис. 2.1). До калориметра поміщений електричний нагрівальний елемент, за допомогою якого підводиться тепло до досліджуваного повітря. Живлення нагрівача здійснюється від мережі через лабораторний автотрансформатор ЛАТР 1, що дозволяє регулювати потужність N . Вимір потужності проводиться ватметром.

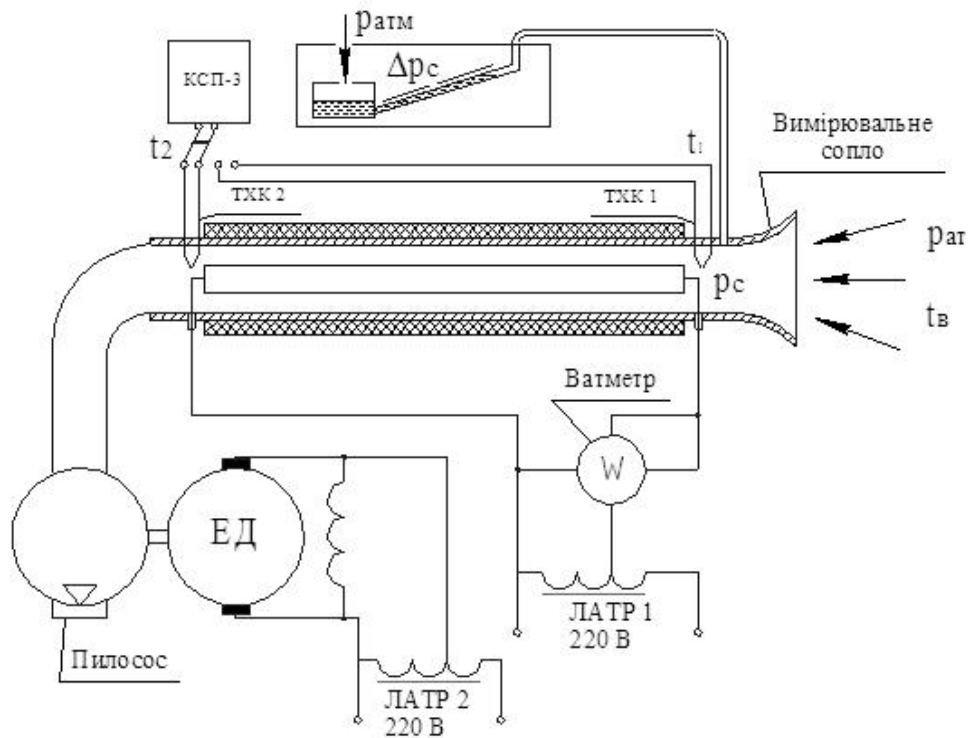


Рисунок 2.1 – Проточний калориметр

Досліджуване повітря всмоктується з приміщення лабораторії вентилятором і проходить через вимірювальне сопло та калориметр. Величина витрати повітря, що проходить через калориметр, визначається за перепадом тиску Δp_c тягонапороміра і розмірами вимірювального сопла. Температура повітря на вході до калориметра t_1 вимірюється за допомогою хромель-копелевої термопары ТХК1, підключеної до автоматичного електронного потенціометра КСП-3. До цього потенціометра через перемикач підключена також хромель-копелева термопара ТХК2, що вимірює температуру повітря t_2 на виході з калориметра. Термопары не мають холодних спайів з нуль-термостатом, тому в автоматичному потенціометрі є спеціальний компенсаційний прилад, що замінює холодний спай термопары з нуль-термостатом.

Порядок виконання роботи

1. Перед початком вимірювань необхідно ввімкнути вентилятор, автоматичний потенціометр КСП-3, нагрівач калориметра та спостерігати за зростанням температури повітря на виході з калориметра.

2. Після досягнення сталого режиму через кожні 3 хв записувати дані з ватметра, тягонапороміра й автоматичного потенціометра КСП-3.

3. Результати вимірювань занести до протоколу випробувань (табл. 2.3). У всіх подальших розрахунках використовують середні за час вимірювання значення параметрів, що визначаються як середнє арифметичне записаних показань відповідних приладів.

Таблиця 2.3 – Протокол випробувань

$$B = \dots \text{ мм рт. ст.}; \quad t_a = \dots \text{ }^\circ\text{C}; \quad \varphi = \dots \text{ } \%; \quad D_c = \dots \text{ мм.}$$

Найменування величин	Позначення	Розмірність	Виміри			Середнє значення
			1-й	2-й	3-й	
1. Температура повітря на вході до калориметра	t_1	$^\circ\text{C}$				
	T_1	K				
2. Температура повітря на виході з калориметра	t_2	$^\circ\text{C}$				
	T_2	K				
3. Перепад тиску у вимірювальному соплі	Δp_c	Па				
4. Потужність нагрівача	$N_{\text{эн}}$	Вт				
5. Питома ізобарна масова теплоємність (дослід)	$c_{pm}^{\ddot{a}} \Big _{t_1}^{t_2}$	$\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$				
6. Питома ізобарна масова теплоємність (таблична)	$c_{pm}^T \Big _0^{t_1}$	$\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$				
	$c_{pm}^T \Big _0^{t_2}$	$\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$				
7. Розрахункове значення теплоємності за формулою (2.9)	$c_{pm}^p \Big _{t_1}^{t_2}$	$\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$				
8. Показник адіабати	$k = \frac{c_p}{c_v}$					

4. Визначити експериментальне значення середньої питомої масової ізобарної теплоємності за виразом:

$$c_{pm} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\Delta Q}{m \Delta t} = \frac{\frac{\Delta Q}{\tau}}{\frac{m}{\tau} \Delta t}, \quad (2.6)$$

де m – маса повітря, що нагрівається, кг; τ – час підведення тепла до повітря, с.

В залежності (2.6) величина $\Delta Q/\tau=N_{en}$ практично дорівнює потужності електричного нагрівача, а $m/\tau = G$ – це масова витрата через проточний калориметр.

З урахуванням уведених позначень формула для розрахунку величини середньої питомої масової ізобарної теплоємності набуде вигляду:

$$c_{pm}^{\ddot{a}} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{N_{ei}}{G \cdot (t_2 - t_1)}. \quad (2.7)$$

Значення масової витрати, кг/с, можна обчислити за виразом:

$$G = \mu_c \frac{\pi D_c^2}{4} \sqrt{2 \rho_c \Delta p_c}, \quad (2.8)$$

де D_c – діаметр вимірювального сопла, м; Δp_c – перепад тиску за тягонапороміром, Па; ρ_c – густина повітря у вимірювальному соплі, кг/м³; $\mu_c = 0,95$ – коефіцієнт витрати сопла.

Величину ρ_c можна визначити з рівняння стану ідеального газу. Так із

$$\frac{p_c}{\rho_c} = RT_c \text{ отримаємо } \rho_c = \frac{p_c}{RT_c}. \text{ З незначною похибкою можна вважати } p_c \cong p_a,$$

$$T_c = T_a, \text{ тоді } \rho_c \cong \frac{p_a}{RT_a}. \text{ Атмосферний тиск } p_a \text{ і температуру } T_a \text{ необхідно перевес-$$

ти в одиниці СІ за такими виразами:

$$p_a = 133,3 \cdot B, \text{ Па; } T_a = 273 + t_a,$$

де B – барометричний тиск у мм рт. ст.

Газову сталу повітря прияти $R = 287$ Дж/(кг·К).

5. Визначити розрахункове значення середньої масової ізобарної теплоємності в діапазоні температур t_1 і t_2 за виразом:

$$c_{pm}^p \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{pm}^T \Big|_0^{t_2} t_2 - c_{pm}^T \Big|_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}. \quad (2.9)$$

Значення середніх теплоємностей $c_{pm}^T|_0^{t_1}$ і $c_{pm}^T|_0^{t_2}$ визначити за формулами, наведеними у табл. 2.2.

6. Визначити показник адіабати для повітря, вважаючи, що повітря є ідеальним газом, за виразом:

$$k = \frac{c_{pm}}{c_{vm}}.$$

Середню масову ізохорну теплоємність c_{vm} визначити з рівняння Маєра за виразом:

$$c_{vm} = c_{pm} - R. \quad (2.10)$$

Результати розрахунків занести до протоколу випробувань.

7. Порівняти між собою отримані значення середніх теплоємностей c_{pm}^{∂} і c_{pm}^P . Зробити висновок.

Контрольні питання

1. Що називають теплоємністю речовини?
2. Які теплоємності розрізняють залежно від процесу підведення тепла й вибраних одиниць вимірювання кількості речовини?
3. Чому ізобарна теплоємність більша за ізохорну та яким рівнянням визначається зв'язок між ними?
4. Від яких параметрів робочого тіла залежить теплоємність?
5. Пояснити фізичний зміст понять: «істинна» і «середня» теплоємність.
6. Як за табличними даними визначити середню теплоємність для заданого інтервалу температур?
7. Записати залежності між питомими масовою, об'ємною і мольною теплоємностями речовини.
9. Чому чисельно дорівнює характеристична газова стала речовини й універсальна газова стала?

Література: [1, с. 15...17, с. 26...32].

Лабораторна робота № 3

Тема. Визначення параметрів вологого повітря

Мета: вивчення методів експериментального й аналітичного визначення основних параметрів вологого повітря: відносної вологості, вологовмісту й ентальпії.

Короткі теоретичні відомості

Вологим повітрям називається суміш сухого повітря та водяної пари.

В атмосферному повітрі, як правило, пара знаходиться під невеликим парціальним тиском і в перегрітому стані. Тому вологе повітря можна розглядати як суміш ідеальних газів за винятком станів, що супроводжуються конденсацією водяної пари.

Основними характеристиками вологого повітря є: абсолютна і відносна вологість, густина, молярна маса, газова стала, вологовміст і ентальпія.

Абсолютною вологістю повітря називають масу m_n водяної пари, що припадає на 1 м^3 вологого повітря, та визначають за виразом:

$$\rho_n = \frac{m_n}{V_{\text{в.пов.}}} \quad (3.1)$$

Оскільки пара поширюється у всьому обсязі повітря та має певний парціальний тиск за даної температури, то абсолютна вологість дорівнює густині пари при її парціальному тиску і температурі повітря. Максимальна абсолютна вологість насиченого повітря дорівнює густині насиченої пари ρ_n за температури повітря.

Відносною вологістю називають відношення дійсного вмісту водяної пари у вологому повітрі до максимально можливого її вмісту в тому самому об'ємі вологого повітря за даної температури:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n} \cdot 100. \quad (3.2)$$

Значення φ може змінюватися від $\varphi = 0$ (сухе повітря) до $\varphi = 100 \%$ (вологе насичене повітря).

Оскільки у процесах, що відбуваються з вологим повітрям (підігрівання, охолодження), маса сухого повітря $m_{c.нов.}$ не змінюється, то доцільно всі питомі величини відносити до 1 кг сухого повітря. Маса водяної пари, що припадає на 1 кг сухого повітря, називається вологовмістом і позначається буквою d :

$$d = \frac{m_n}{m_{c.нов.}}. \quad (3.3)$$

Величина d вказує, скільки грамів пари знаходиться в 1 кг сухого повітря, і має розмірність $г/(кг\ c.нов.)$.

Зазвичай стан вологого повітря задається двома параметрами – його температурою та відносною вологістю. Якщо для вимірюється температури повітря можуть бути використані ртутні термометри, термометри опору, термопари, то для визначення відносної вологості повітря застосовують спеціальні прилади – гігрометри та психрометри.

Прилади й обладнання

Гігрометр (від грецького *hygros* – вологий і *metreo* – вимірюю) – прилад для визначення абсолютної та відносної вологості повітря. Чутливим елементом гігрометра слугують людська волосина чи органічна (тваринна) нитка, що володіють властивістю змінювати свою довжину залежно від вмісту водяної пари в повітрі. Людська волосина чи органічна нитка попередньо обробляються з метою видалення з них жиру і верхнім кінцем закріплюються в рамці приладу. Нижній кінець волосини обертають навколо валика, на якому закріплена стрілка з противагою, та закріплюють на рамці приладу. У разі зміни довжини волосини чи нитки валик повертається та відповідно переміщається стрілка. Шкала гігрометра градується безпосередньо у відсотках відносної вологості.

Психрометр (від грецького *psychros* – холодний і *metreo* – вимірюю) – прилад для визначення вологості та температури повітря. Найпростіший психрометр складається із сухого та змоченого термометрів. За різницею показань цих термометрів за допомогою таблиць і графіків визначають абсолютну й відносну вологість повітря. Окрім того, за показниками термометрів і таблицями

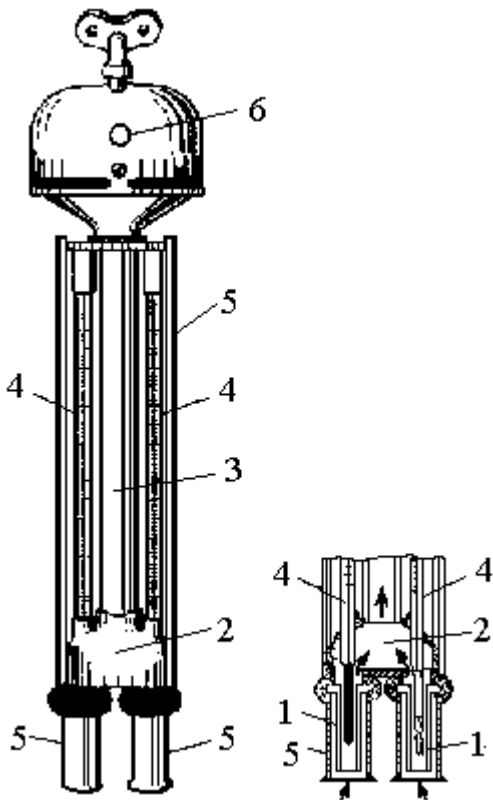


Рисунок 3.1 – Аспіраційний психрометр

визначають точку роси та максимальний парціальний тиск водяної пари в повітрі. Поширені аспіраційні психрометри.

На рис. 3.1 наведено схему аспіраційного психрометра. Він складається з двох однакових ртутних термометрів 4, закріплених у термотримачі, що складається з трубок захисту 1, аспіраційної чашки 2, повітропровідної трубки 3 і термозахистів 5.

Резервуари термометрів уміщені в трубки захисту з повітряним зазором між ними. Призначення трубок захисту – виключити нагрівання резервуарів термометрів від сонячних променів, для чого зовнішня поверхня трубок ретельно полірується та нікелюється.

Самі трубки ізольовані одна від одної теплоізоляційними шайбами.

Трубки захисту з'єднані аспіраційною чашкою з повітропровідною трубкою, на верхньому кінці якої закріплена аспіраційна головка 7. Аспіраційна головка має електромотор і вентилятор. Для підключення до мережі психрометр оснащений шнуром з вишкою 6.

Термометри захищені з боків від механічних пошкоджень термозахистами.

Перед роботою резервуар лівого термометра обертають батистом в один шар і змочують чистою дистильованою водою за допомогою гумового балона з піпеткою. Сухий термометр показує дійсну температуру t_c , а мокрий, з деяким ступенем наближення, теоретичну температуру t_m мокрого термометра. Показання мокрого термометра тим ближчі до теоретичної температури мокрого термометра t_m , чим більша швидкість потоку, що обдуває чутливу частину цього термометра.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити конструкцію аспіраційного психрометра. Визначити ціну поділки сухого та мокрого термометрів. Під час визначення вологості на відкритому повітрі психрометр винести з приміщення влітку за чверть години до спостереження, а взимку – не менш ніж за півгодини. Змочити батист на резервуарі термометра. Поза приміщенням це змочування проводиться взимку за півгодини (а влітку – за чотири хвилини) до початку спостережень. Для цього необхідно взяти гумовий балон з піпеткою, заздалегідь наповнений дистильованою водою, і легким натиском довести воду в піпетці до риски. Якщо риска відсутня, то доводять воду не ближче ніж на 1 см до краю піпетки й утримують її на цьому рівні за допомогою затиску. Після цього піпетку вводять до кінця у внутрішню трубу захисту і змочують батист на резервуарі термометра. Через деякий час, не виймаючи піпетки з трубки, розтискають затиск, прибираючи зайву воду до балона, після чого піпетку виймають. Потім необхідно ввімкнути електромотор. Через 4 хвилини після ввімкнення електромотора провести вимірювання за термометрами. Отримані значення температур сухого t_c і мокрого t_m термометрів занести до протоколу випробувань (табл. 3.1).

2. Визначити відносну вологість повітря φ за допомогою спеціальних психрометричних таблиць (табл. Б.2 додатку Б).

3. Визначити відносну вологість повітря φ за hd – діаграмою вологого повітря.

4. Визначити відносну вологість повітря φ за психрометричним графіком.

5. Визначити відносну вологість повітря φ за формулою. Для психрометра з примусовою вентиляцією формула для визначення відносної вологості повітря у % має вигляд:

$$\varphi_{\varphi} = \frac{100}{P_{нс}} [p_{нм} - AB(t_c - t_m)], \quad (3.4)$$

де B – абсолютний тиск вологого повітря, мм рт. ст.; $p_{нм}$, $p_{нс}$ – максимально можливий за температури t_m і t_c парціальний тиск насиченої водяної пари, мм рт. ст.; $A = 0,7 \cdot 10^{-3}$ – психрометрична стала.

Значення парціального тиску визначаються за таблицями насиченої водяної пари або за hd -діаграмою вологого повітря.

6. Величину відносної вологості φ_d , визначеної за hd -діаграмою, психрометричним графіком φ_m , психрометричними таблицями φ_m , необхідно порівняти між собою і зі значенням φ_ϕ , отриманим за формулою (3.4).

7. За hd -діаграмою визначити вологовміст і ентальпію вологого повітря. Результати вимірювань і розрахунків занести до протоколу вимірювань.

Таблиця 3.1 – Протокол вимірювань

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Атмосферний тиск повітря	B		мм рт. ст.
Температура сухого термометра	t_c		°C
Температура мокрого термометра	t_m		°C
Показання волосяного гігрометра	φ_l		%
Відносна вологість повітря за психрометричним графіком	φ_z		%
Відносна вологість повітря за hd -діаграмою	φ_d		%
Відносна вологість за психрометричними таблицями	φ_m		%
Відносна вологість повітря, визначена за формулою (3.4)	φ_ϕ		%
Вологовміст вологого повітря	d		г/(кг с. пов.)
Ентальпія вологого повітря	$h_{e.пов}$		кДж/(кг с. пов.)
Парціальний тиск водяної пари	p_n		кПа

Контрольні питання

1. Яке повітря називають вологим?
2. Яке повітря називається вологим насиченим і вологим ненасиченим?
3. Дайте визначення абсолютної та відносної вологості вологого повітря.
4. Дайте визначення вологовмісту вологого повітря.

5. Пояснити принцип роботи та будову гігрометрів і психрометрів.
6. Лінії яких процесів нанесені на hd -діаграмі?
7. На які ділянки поділяє hd -діаграму лінія насичення $\varphi_n = 100\%$?
8. Що називається температурою точки роси та яким чином її визначають?
9. Як можна визначити величину ентальпії вологого повітря?
10. Що таке істинна температура мокрого термометра?
11. Як знайти стан вологого повітря на hd -діаграмі за значеннями сухого та мокрого термометра?
12. За яких незмінних характеристик вологого повітря відбуваються процеси підігріву й адіабатного зволоження повітря?

Література: [1, с. 74...82].

Лабораторна робота № 4

Тема. Дослідження процесу стиснення газу в поршневому компресорі

Мета: вивчення принципу роботи одноступеневого поршневого компресора та методики визначення експериментальних даних; виконання термодинамічного аналізу політропного процесу стиснення.

Короткі теоретичні відомості

Компресор – це прилад, призначений для стиснення газів. Принцип дії ідеального поршневого компресора полягає в наступному (рис. 4.1): під час руху поршня зліва направо тиск у циліндрі компресора стає меншим за тиск p_1 , і під дією різниці тисків відкривається всмоктувальний клапан. Циліндр заповнюється газом. Усмоктування зображується на індикаторній діаграмі (рис. 4.1) лінією 4–1. Під час зворотнього руху поршня тиск у циліндрі компресора підвищується і стає більшим за p_1 . Під дією різниці тиску всмоктувальний клапан закривається і газ стискається по лінії 1–2. Тиск у циліндрі збільшується до того моменту, поки не стане більшим за тиск p_2 . Під дією різниці тисків відкривається нагнітальний клапан, і газ виштовхується поршнем у мережу (лінія 2–3). Потім нагнітальний клапан закривається, і всі процеси повторюються.

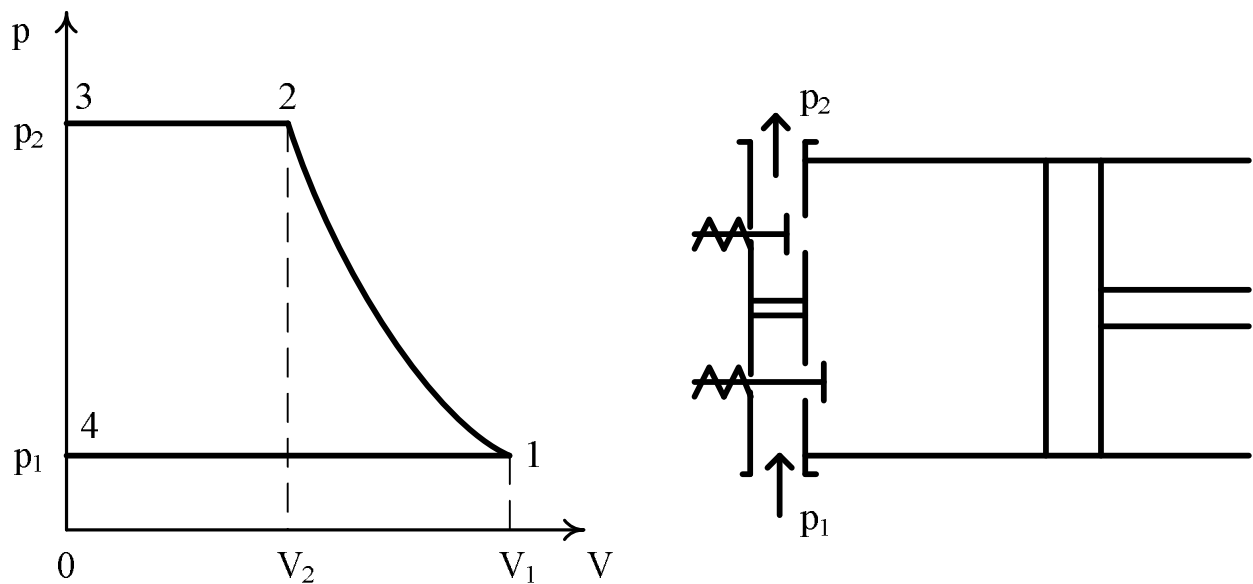


Рисунок 4.1 – Схема ідеального поршневого компресора та його індикаторна діаграма

На стиснення та переміщення 1 кг газу витрачається робота l_{max} , яку здійснює двигун, що обертає вал компресора. Позначивши її через $l_k = -l_{max}$, можна записати

$$l_k = \int_{p_1}^{p_2} v dp.$$

На індикаторній діаграмі l_k зображується площею 1234.

Технічна робота, виконана в компресорі, залежить від характеру процесу стиснення. На рис. 4.2 зображено ізотермічний ($n = 1$), адіабатний ($n = k$) і політропний процеси стиснення. Стиснення за ізотермою дає найменшу площу, а значить, стиснення відбувається з найменшою витратою роботи, отже, застосування ізотермічного стиснення в компресорі є енергетично найбільш вигідним.

Щоб наблизити процес стиснення до ізотермічного, необхідно відводити теплоту від стисненого газу. Це досягається шляхом охолодження зовнішньої поверхні циліндра.

Однак практично стиснення газу в компресорі здійснюється за політропою з показником $n = 1,18 - 1,20$, оскільки досягти значення $n = 1$ не вдається.

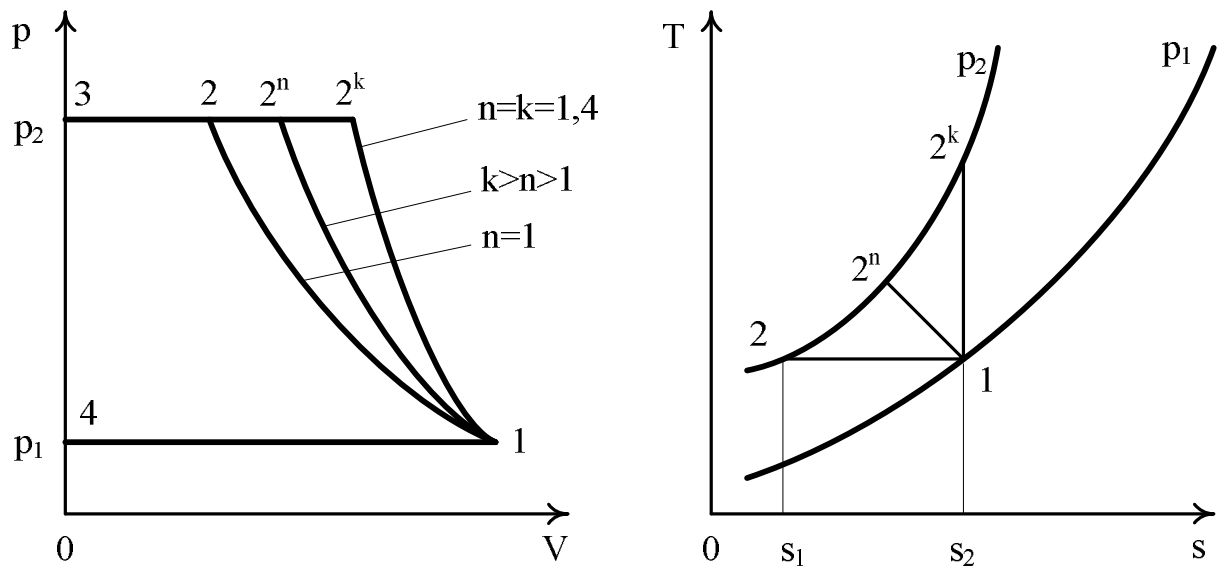


Рисунок 4.2 – Схема процесу стиснення

Теоретична робота ідеального компресора під час політропного стиснення визначається за виразом

$$l_k = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right].$$

Якщо позначити витрати газу в компресорі через m , кг/с, то теоретична потужність привода компресора визначається за виразом:

$$N_0 = m \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right].$$

Прилади й обладнання

Принципову схему лабораторної установки наведено на рис. 4.3. Привод компресора здійснюється електродвигуном 1. Через клинопасову передачу обертання передається на колінчастий вал із кривошипно-шатунним механізмом 2 і за допомогою останнього перетворюється на зворотно-поступальний рух поршня 3 у циліндрі компресора 4.

Під час руху поршня 3 з крайнього верхнього положення вниз тиск у циліндрі 4 стає меншим за атмосферний, відкривається всмоктувальний клапан 5, через який відбувається заповнення циліндра повітрям при тиску p_1 .

Нагнітальний клапан 6 у цей час закритий, тому що зовні на нього діє тиск p_2 , який дорівнює тиску в повітрязбірнику 10.

Пройшовши крайнє нижнє положення, поршень починає рухатися вгору. Об'єм зменшується, тиск у циліндрі підвищується, і всмоктувальний клапан закривається. Під час подальшого руху поршня відбувається процес стиснення повітря.

Коли тиск у циліндрі 4 стане більшим за тиск у повітрязбірнику, відкривається нагнітальний клапан 6 і повітря виштовхується із циліндра під тиском p_2 . Процес нагнітання закінчується, коли поршень досягне крайнього верхнього положення. При цьому деяка кількість повітря під тиском p_2 залишається в камері стиснення («шкідливий простір»). Наступний рух поршня вниз призведе до зменшення тиску в циліндрі компресора та закриття нагнітального клапана. Під час подальшого руху поршня відбувається розширення газу, який залишився в камері стиснення, зі зменшенням тиску від p_2 до p_1 . Всмоктувальний клапан відкриється після того, як тиск повітря в циліндрі стане меншим за p_1 . Цикл повторюється.

Параметри повітря на виході з компресора, температуру t_2 і тиск p_2 вимірюють відповідно хромель-алюмелевою термопарою 7, підключеною до автоматичного потенціометра 8, і манометром 9.

Тиск нагнітання регулюються вентилем 11. Лічильник 12 показує кількість повітря, поданого до газозбірника за певний проміжок часу τ . Температура і тиск навколишнього середовища (параметри повітря на вході в компресор) вимірюються ртутним термометром і барометром БМ-2 відповідно.

Технічна характеристика компресора наведена на стенді.

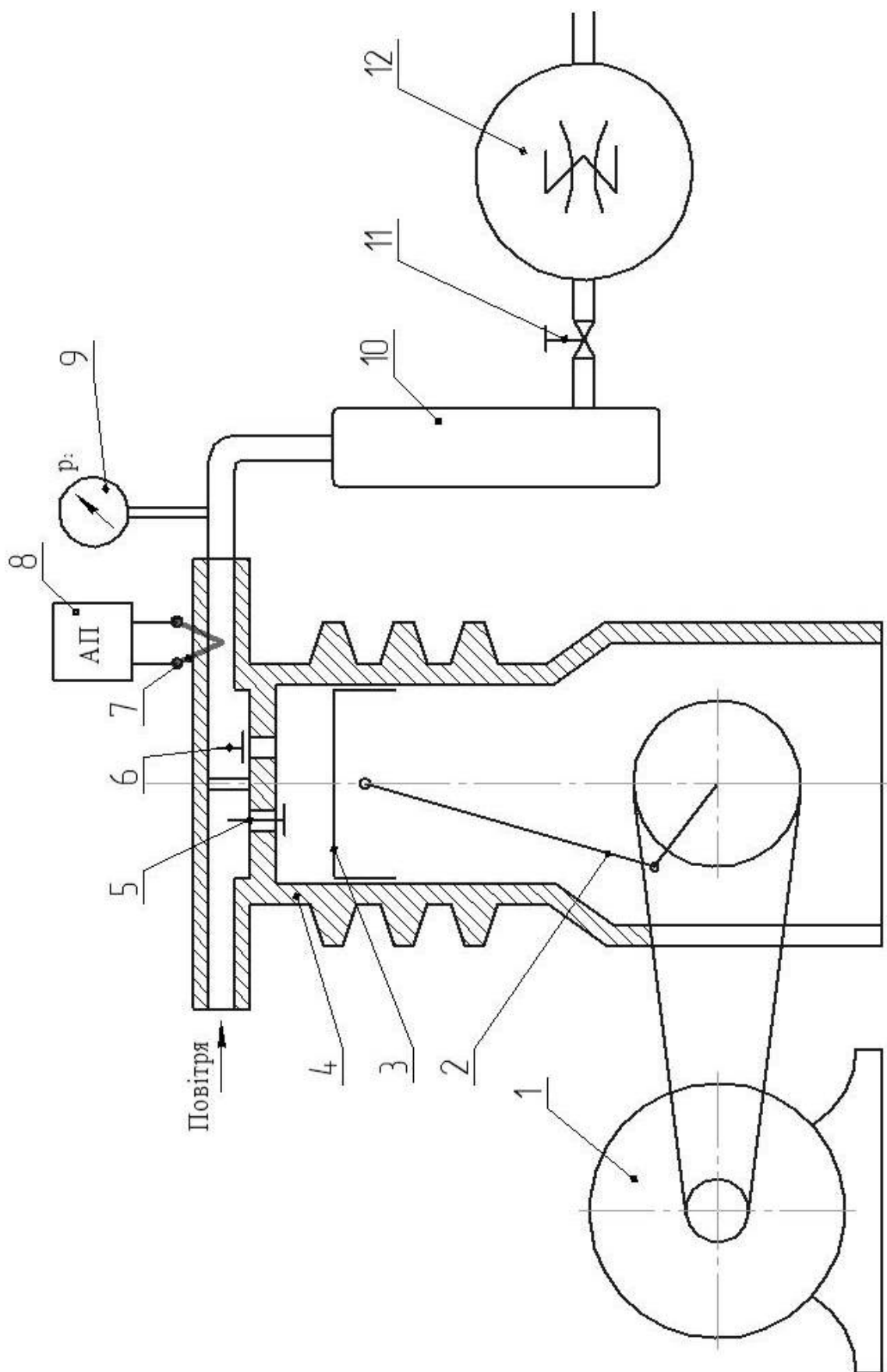


Рисунок 4.3 – Схема установки для дослідження стиснення повітря в поршневому компресорі

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку та встановити необхідний тиск у повітрозбірнику за допомогою регулювального вентиля. При сталому тепловому режимі роботи компресора (температура повітря на виході з компресора не змінюється) зробити необхідні вимірювання, результати внести до протоколу випробувань (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Протокол випробувань

В = мм рт. ст.; t = °С; φ = %;

Найменування величини	Позначення	Величина			
		За приладом		В одиницях СІ	
		розмірність	значення	розмірність	значення
Температура повітря, що всмоктується	T_1	°С		К	
Надлишковий тиск на виході з компресора	p_2	кгс/см ²		Н/м ²	
Температура повітря на виході з компресора	T_2	°С		К	
Кількість повітря, що пройшла через лічильник протягом часу τ	V_τ	м ³		м ³	
Час, за який пройде через лічильник кількість повітря V_τ	τ	с		с	

2. Визначити абсолютний тиск повітря на початку процесу стиснення за виразом:

$$p_1 = \varepsilon p_0,$$

де $\varepsilon = 0,9$ – коефіцієнт опору всмоктувального тракту; p_0 – атмосферний тиск, Па.

3. Визначити об'єм повітря на початку процесу стиснення. Він дорівнює повному об'єму циліндра, який визначається так:

$$V_1 = V_h + V_c,$$

де V_h – робочий об'єм, м³; V_c – об'єм камери стиснення, м³.

4. Визначити масу повітря з рівняння ідеального газу

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1},$$

де $R = 287$ Дж/(кг·К) – газова стала повітря.

5. Визначити абсолютний тиск наприкінці стиснення за формулою:

$$p_2 = p_{2изб} + p_0.$$

6. Визначити об'єм повітря наприкінці процесу стиснення за виразом:

$$V_2 = \frac{mRT_2}{p_2}.$$

7. Визначити показник політропи n_c стиснення повітря:

$$n_c = \frac{\lg \frac{p_2}{p_1}}{\lg \frac{V_1}{V_2}}.$$

8. Визначити роботу стиснення газу за виразом:

$$L = \frac{mR}{n_c - 1} (T_1 - T_2).$$

9. Обчислити зміну внутрішньої енергії повітря в процесі стиснення:

$$\Delta U = mc_v(T_2 - T_1),$$

де $c_v = 720 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – середня масова теплоємність в ізохорному процесі.

10. Визначити кількість тепла, відведена в процесі стиснення від газу через стінки циліндра за формулою:

$$Q = mc_n(T_2 - T_1),$$

де $c_n = c_v \frac{n_c - k}{n_c - 1}$, тут $k = 1,4$ – показник адіабати для повітря.

11. Перевірити правильність розрахунків за першим законом термодинаміки:

$$L = Q - \Delta U.$$

12. Визначити зміну ентропії в процесі стиснення за виразом:

$$\Delta S = mc_n \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

13. Визначити фактичну витрату повітря за формулою:

$$V_\phi = \frac{V_\tau}{\tau}.$$

14. Визначити теоретичну витрату повітря за виразом:

$$V_m = 2V_h\omega.$$

15. Визначити об'ємний к. к. д. компресора за виразом:

$$\eta_0 = \frac{V_\phi}{V_m}.$$

16. За отриманими даними побудувати індикаторну діаграму роботи поршневого компресора в pV -координатах за зразком, наведеним на рис. 4.4.

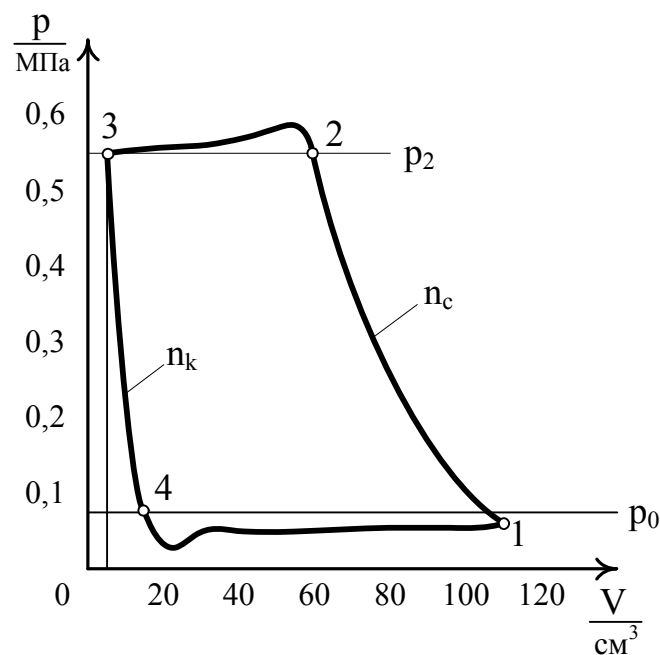


Рисунок 4.4 – Індикаторна діаграма роботи поршневого компресора

Контрольні питання

1. Пояснити принцип роботи одноступеневого компресора.
2. Які параметри та за допомогою яких приладів вимірюються в процесі виконання лабораторної роботи?

3. Яким чином визначити масу та параметри стану робочого тіла в початковій і кінцевій точках процесу стиснення?
4. Сформулювати перший закон термодинаміки відносно процесу стиснення повітря в компресорі.
5. Довести, що ізотермічний та адіабатний процеси стиснення в компресорі є окремими випадками політропного процесу.
6. Проаналізувати, у якому з можливих процесів стиснення – політропному, ізотермічному чи адіабатному – значення кінцевої температури T_2 буде найбільшим, а в якому – найменшим.
7. Зобразити відносне розташування ліній політропного, адіабатного й ізотермічного процесів стиснення в $p\nu$ - і Ts -координатах.
8. Які зміни необхідно внести до конструкції компресора, щоб процес стиснення повітря наблизити до адіабатного, ізотермічного?

Література: [1, с. 94...100].

Лабораторна робота № 5

Тема. Визначення коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів методом циліндра

Мета: поглиблення знань з вивчення одного з видів теплообміну – теплопровідності, набуття навичок експериментального визначення коефіцієнта теплопровідності твердих тіл.

Короткі теоретичні відомості

Теплопровідність – один з видів теплообміну, що являє собою процес поширення теплоти між безпосередньо дотичними тілами чи частинами одного тіла з різною температурою.

У газах перенесення енергії у вигляді теплоти теплопровідністю відбувається шляхом дифузії молекул і атомів; у рідинах і твердих діелектриках – під час поширення пружних хвиль. У металах перенесення енергії здійснюється іо-

нами ґрат і дифузією вільних електронів, пружні коливання кристалічних ґрат у цьому випадку не мають істотного значення.

Поширення тепла шляхом теплопровідності відбувається в просторі й в часі. Тому аналітичне дослідження теплопровідності зводиться до вивчення просторово-тимчасової зміни температури, тобто до пошуку залежності:

$$t = f(x, y, z, \tau).$$

Сукупність миттєвих значень температури в усіх точках досліджуваного простору називається температурним полем. Стаціонарне температурне поле – це таке поле, температура якого в будь-якій точці не змінюється в часі, тобто є тільки функцією координат:

$$t = f(x, y, z).$$

Якщо з'єднати точки поля, що мають однакову температуру, то можна отримати ізотермічну поверхню. Перетин ізотермічних поверхонь площиною дає на цій площині сімейство ізотерм – ліній постійної температури. Поздовж ізотерми температура не змінюється, у будь-якому іншому випадку вона може змінюватися. Найбільший перепад температури на одиницю довжини відбувається в напрямку нормалі до ізотермічної поверхні; він характеризується градієнтом температури, тобто вектором, що зкерований по нормалі до ізотермічної поверхні в бік зростання температури.

Кількість тепла Q , що проходить за одиницю часу через ізотермічну поверхню, називається тепловим потоком, а кількість тепла q , що проходить за одиницю часу через одиничну площу ізотермічної поверхні – щільністю теплового потоку.

Для ізотропного середовища процес перенесення теплоти теплопровідністю описується законом Фур'є, згідно з якими вектор q щільності теплового потоку пропорційний градієнту температури і протилежний йому за напрямком:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dn},$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, що залежить від природи середовища та його стану, Вт/(м·К); dt/dn – частинна похідна температури за напрямком нормалі до ізотермічної поверхні.

Коефіцієнт теплопровідності λ чисельно дорівнює кількості тепла, що проходить за одиницю часу через одиницю площі ізотермічної поверхні у разі різниці температури на одиницю довжини нормалі в один градус. Коефіцієнт теплопровідності залежить від тиску і температури. Для більшості речовин коефіцієнти теплопровідності визначаються експериментальним шляхом, а для технічних розрахунків беруть з довідкових таблиць. Як свідчать результати досліджень, для багатьох матеріалів залежність коефіцієнта теплопровідності від температури може бути взята лінійною:

$$\lambda = \lambda_0 [1 \pm b(t - t_0)], \quad (5.1)$$

де λ_0 – коефіцієнт теплопровідності при температурі t_0 ; t – температура, °С; b – температурний коефіцієнт, який визначається експериментально.

Кращими провідниками теплоти є метали. У металів λ змінюється від 3 до 458 Вт/(м·К). Коефіцієнти теплопровідності чистих металів, за винятком алюмінію, зі зростанням температури зменшуються. Найбільшим теплопровідним металом є срібло.

Коефіцієнти теплопровідності теплоізоляційних і будівельних матеріалів, що мають пористу структуру, у разі підвищення температури зростають за лінійним законом і змінюються в межах від 0,02 до 3,0 Вт/(м·К).

Коефіцієнти теплопровідності більшості краплинних рідин з підвищенням температури зменшуються; їх значення знаходяться в межах від 0,08 до 0,65 Вт/(м·К). Від тиску коефіцієнти теплопровідності краплинних рідин практично не залежать.

Коефіцієнти теплопровідності газів у разі підвищення температури зростають. Експериментальні дослідження свідчать, що λ газів змінюється від 0,005 до 0,6 Вт/(м·К). Від тиску коефіцієнти теплопровідності газів практично не залежать.

Для випадку однорідної нескінченно довгої циліндричної стінки з внутрішнім d_1 і зовнішнім d_2 діаметрами, напрямок нормалі збігається з радіусом, і закон Фур'є записується у вигляді:

$$Q = -2\lambda\pi r l \frac{dt}{dr},$$

де Q – кількість тепла, що проходить через кільцевий шар завтовшки dr , радіусом r , причому $l \gg r$.

Розв'язання цього рівняння при незмінній температурі внутрішньої t_1 та зовнішньої стінок t_2 і $\lambda = const$ дає таку залежність:

$$Q = \frac{2\pi\lambda l}{\ln(d_2/d_1)} \cdot (t_1 - t_2).$$

Закон теплопровідності Фур'є можна записати у вигляді, аналогічному закону Ома в електротехніці, увівши поняття про термічний опір теплопровідності R . Для циліндричної труби:

$$R = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}.$$

Порівнюючи формули, можна побачити, що лінійний термічний опір приведений до одного метра довжини труби. Знаючи лінійний термічний опір, можна обчислити і тепловий потік через стінку труби довжиною l .

Прилади й обладнання

Визначення коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів методом циліндра проводиться на лабораторній установці, схему якої наведено на рис. 5.1.

З матеріалу, коефіцієнт якого необхідно визначити, виготовлений циліндр 1 із внутрішнім d_1 і зовнішнім d_2 діаметрами. У середині досліджуваного циліндра розміщено електронагрівач 8. Для забезпечення сталості температури по внутрішній поверхні досліджуваного циліндра встановлений порожній тонкостінний металевий циліндр 2, що щільно стикається з матеріалом циліндра 1. З цією же метою на зовнішній поверхні досліджуваного циліндра встановлений

порожній тонкостінний циліндр 3. Для зменшення теплових втрат торці циліндра закриті теплоізоляційними заглушками 4 і 9.

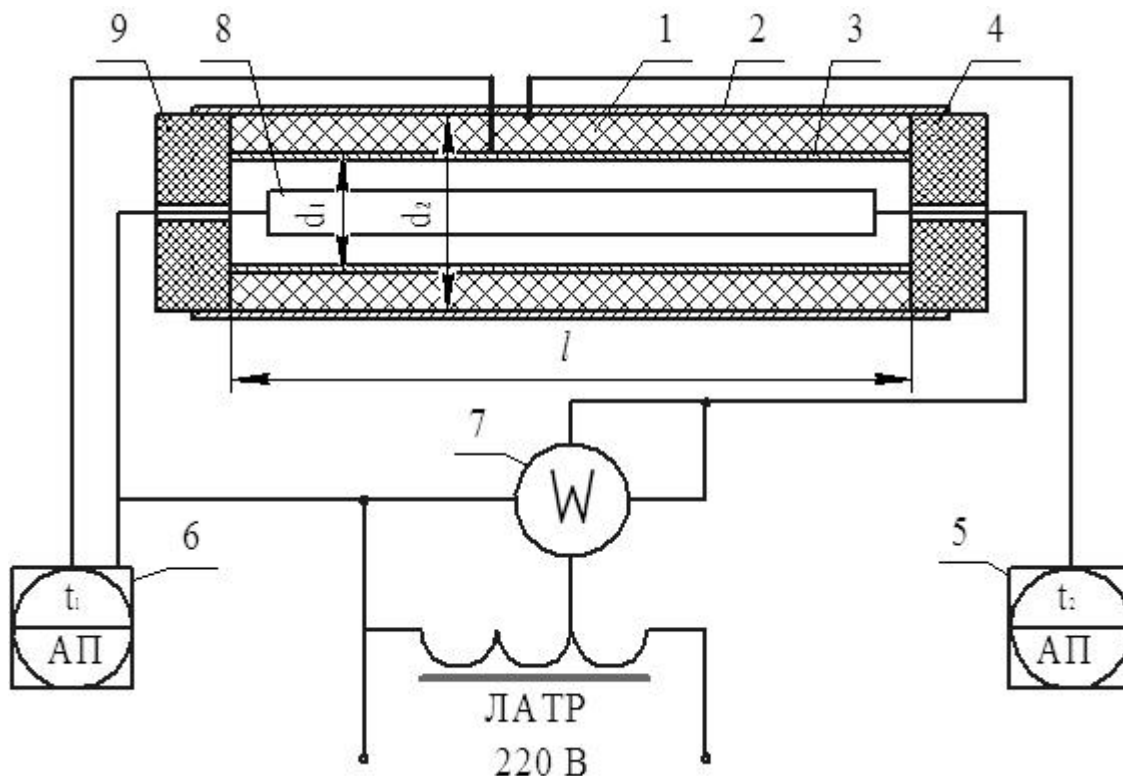


Рисунок 5.1 – Схема установки для визначення коефіцієнта теплопровідності твердих матеріалів методом циліндра

Тепловий потік, що виділяється електронагрівачем, приймають рівним електричній потужності, підведеної до нагрівача. Він регулюється регулятором напруги ЛАТР і вимірюється ватметром 7.

Температура внутрішньої та зовнішньої поверхонь досліджуваного циліндра вимірюється поверхневими термопарами 10 і 11, підключеними до автоматичних потенціометрів 5 і 6.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити будову лабораторної установки й ознайомитися з розташуванням приладів на панелі керування. Увімкнути тумблери МЕРЕЖА, ТЕН, ПОТЕНЦІОМЕТРИ. Регулюючи ручкою ЛАТР потужність електронагрівача, отримати перший стаціонарний режим нагрівання досліджуваного циліндра. Момент досягнення стаціонарного режиму визначається за діаграмою запису температури t_1 і t_2 автоматичними потенціометрами 5 і 6. За умови сталого температурного режиму крива на діаграмі являє собою дугу кола.

2. Після досягнення стаціонарного режиму записати до протоколу вимірювань (табл. 5.1) величину потужності N і температуру внутрішньої t_1 і зовнішньої t_2 стінок.

Знову, регулюючи ручкою ЛАТР величину потужності електронагрівача, отримати другий стаціонарний режим та нові значення температури t_1 і t_2 . Занести отримані дані до протоколу випробувань і перевести установку для одержання наступного стаціонарного режиму і т. д. Коефіцієнт теплопровідності досліджуваного матеріалу необхідно визначити на п'ятьох стаціонарних режимах, що вирізняються величиною теплового потоку і температурою внутрішньої та зовнішньої стінок досліджуваного циліндра.

Таблиця 5.1 – Протокол вимірювань

$$B = \text{мм.рт.ст.}; \quad t = \text{°C}; \quad \varphi = \text{\%};$$
$$d_1 = \text{мм} \quad d_2 = \text{мм} \quad l = \text{м}$$

№ пор.	N, Вт	t_1 , °C	t_2 , °C	Q, Вт	R_1 , м·К/Вт	λ , Вт/(м·К)
1						
2						
3						
4						
5						

3. Визначити коефіцієнт теплопровідності твердого матеріалу за виразом

$$\lambda = \frac{Q}{2\pi l(t_1 - t_2)} \ln \frac{d_2}{d_1}.$$

Оскільки частина тепла, що виділяється електронагрівачем, відводиться через торцеві заглушки, то для цього стенда можна вважати

$$Q = 0,93N.$$

4. Визначити лінійний термічний опір теплопровідності циліндричної стінки за формулою:

$$R_l = \frac{\pi l(t_1 - t_2)}{Q}.$$

Отримані результати занести до табл. 5.1.

5. За отриманим коефіцієнтом теплопровідності необхідно визначити матеріал, з якого виготовлено досліджуваний циліндр. Для цього необхідно скористатися довідковою таблицею Б.2, у якій наведено значення коефіцієнтів теплопровідності матеріалів. З таблиці вибирається матеріал, і за формулою (5.1) обчислюється його коефіцієнт теплопровідності при температурі вимірювань.

Оскільки коефіцієнт теплопровідності залежить від температури матеріалу, то експериментально визначене значення коефіцієнта теплопровідності залежить у кожному вимірюванні від середньої температури матеріалу

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

6. Порівняти експериментальні та розрахункові значення коефіцієнтів теплопровідності й зробити висновок про правильність вибору матеріалу. Якщо між отриманими значеннями розбіжність більш ніж 15 %, то необхідно вибрати інший матеріал.

Контрольні питання

1. Який процес поширення теплоти називається теплопровідністю?
2. Яким чином здійснюється перенесення енергії теплопровідністю в газах, рідинах, твердих діелектриках і металах?
3. Що таке температурне поле?

4. Що називають термічним опором теплопровідності?
5. Записати формули для обчислення термічного опору теплопровідності плоскої та циліндричної стінок.
6. Поясніть характер залежності теплопровідності газів, рідин і металів від температури.
7. Сформулюйте закон теплопровідності Фур'є.
8. Наведіть чисельні значення коефіцієнту теплопровідності для різних матеріалів.
9. За яким законом змінюється температура по товщині плоскої стінки, циліндричної стінки?

Література: [1, с. 162...169, 148...151].

Лабораторна робота № 6

Тема. Визначення коефіцієнта тепловіддачі горизонтального циліндра під час вільної конвекції

Мета: експериментальне вивчення впливу різних чинників на тепловіддачу циліндра та встановлення залежності коефіцієнта тепловіддачі від температурного напору. Порівняння отриманих даних з розрахунковими, визначеними за критеріальними рівняннями теплообміну.

Короткі теоретичні відомості

Теплообмін між твердим тілом і рідиною здійснюється одночасно шляхом теплопровідності й конвекції.

Розглядається стаціонарний процес тепловіддачі циліндра, розташованого горизонтально в газовому середовищі.

На відстані від циліндра газ нерухомий, а температура газу не змінюється і дорівнює t_2 . Поверхня циліндра має температуру $t_c > t_2$. температура газу поряд із циліндром змінюється від t_c до t_2 , тому густина газу поряд із стінкою менша за густину газу на відстані від неї. Під дією виникаючої при цьому підйимальної

сили газ біля стінки рухається знизу догори. Рух газу в зазначених умовах називається вільним рухом чи природньою конвекцією.

Кількість тепла, передана шляхом тепловіддачі, визначається за законом Ньютона-Ріхмана

$$Q = \alpha F(t_c - t_s) \tau,$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); F – площа поверхні теплообміну, м²; τ – час, с.

Коефіцієнт тепловіддачі α чисельно дорівнює кількості тепла, переданого одиницею поверхні твердого тіла в навколишнє середовище за одиницю часу у разі різниці температури поверхні й навколишнього середовища в 1 градус.

Коефіцієнт тепловіддачі залежить від:

- режиму руху газу (ламінальний або турбулентний);
- природи виникнення руху (природне або змушене);
- фізичних властивостей газу;
- форми та розміру поверхні.

Через те, що коефіцієнт α залежить від багатьох чинників, він не може бути обчислений аналітично та визначається за емпіричними формулами, що складаються за результатами досліджень у критеріальному вигляді за правилами теорії подібності. Формула в критеріальному вигляді дає зв'язок між безрозмірними комплексами, що називаються критеріями подібності, та дозволяє поширити експериментальні дані досліджуваного явища на групу подібних явищ.

Процес тепловіддачі у разі вільного руху рідини газу для тіл різної форми та розмірів описується критеріальним рівнянням у вигляді ступеневої функції:

$$Nu = c(Gr_m Pr_m)^n, \quad (6.1)$$

де $Nu_m = \frac{\alpha d}{\lambda}$ – критерій Нусельта; $Gr_m = \frac{gd^3 \beta \Delta t}{\nu^2}$ – критерій Гросгофа чи критерій

піднімальної сили; $Pr_m = \frac{\nu}{a}$ – критерій Прандтля чи критерій фізичних властивостей; c та n – величини, що залежать від значення аргументу $Gr_m Pr_m$; d – характерний лінійний розмір, м; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); g – прис-

корення вільного падіння, м/с^2 ; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\text{м}^2/\text{с}$; β – коефіцієнт об'ємного розширення рідини (для газів $\beta = \frac{1}{T_m}$), $1/\text{град}$; a – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$; $a = \frac{\lambda}{c\rho}$.

Для горизонтального циліндра у разі вільного руху газу величини c і n приймають такими $c = 0,5$, $n = 0,25$.

Індекс m вказує, що визначальною для критеріїв подібності є середня температура між температурами стінки t_c та навколишнього середовища t_∞ .

Прилади й обладнання

На рис. 6.1 наведено схему експериментальної установки. Вона складається з труби 2, усередині якої розміщений електронагрівач 4, торці труби теплоізовані заглушками 3 для зменшення втрат тепла через них. Для виміру температури на зовнішній поверхні труби по спіралі приварені 38 термопар 1. Таке розміщення термопар забезпечує більш правильне усереднення вимірюваної температури.

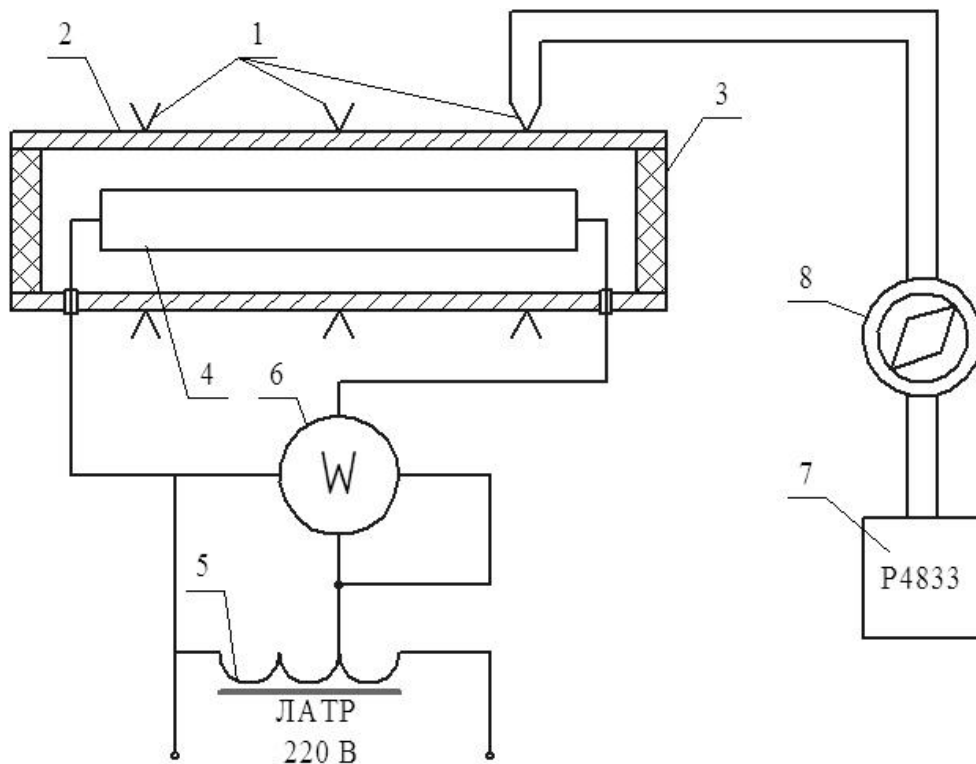


Рисунок 6.1 – Схема експериментальної установки

Регулювання електричного струму, спожитого нагрівачем, здійснюється за допомогою автотрансформатора 5. Потужність нагрівача вимірюється ватметром 6. Електрорушійна сила, що розвивається термопарами, вимірюється за допомогою переносного потенціометра 7 типу Р4833. Термопари підключені до потенціометра через перемикач 8.

Порядок виконання роботи

1. Підготувати установку до роботи й увімкнути нагрівач. Регулюючи потужність нагрівача, установлюють потрібну температуру її зовнішньої поверхні.

2. Після досягнення необхідної температури розпочати вимірювання. При вимірах фіксують потужність нагрівача, е. р. с. термопар і температуру повітря на відстані від труби. Температуру повітря вимірюють термометром, установленим на відстані не менше 1 м від труби по горизонталі.

Вимірювання при даному температурному режимі роблять не менше трьох разів протягом 10 – 15 хвилин.

3. Змінивши потужність нагрівача, установити новий температурний режим. Провести вимірювання при новій температурі зовнішньої поверхні труби. Результати вимірів занести до протоколу вимірювань (табл. 6.1).

4. За градууювальною таблицею стандартної термопари ТХК (табл. Б.1) визначити величини перевищення температури над навколишньою Δt для зазначених у протоколі випробувань точок вимірювання температур.

5. Визначити середньоарифметичне значення Δt_{cp} температурного перепаду по довжині циліндра.

6. Обчислити температуру стінки труби за виразом:

$$t_c = t_z + \Delta t_{cp}.$$

7. Визначити кількість тепла Q_l , передану шляхом теплового випромінювання, за виразом:

$$Q_l = \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right] F,$$

де c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $c_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; ε – ступінь чорноти матеріалу труби. Для сталеві слабок полірованої труби можна брати $\varepsilon = 0,35$; F – площа поверхні дослідної труби; T_c і $T_{жс}$ – абсолютні температури поверхні труби і навколишнього середовища.

Таблиця 6.1 – Протокол вимірювань
 $B = \dots \text{ мм рт. ст.}; \quad t = \dots \text{ }^\circ\text{C}; \quad \varphi = \dots \%; \quad d = \dots \text{ мм}; \quad l = \dots \text{ м};$

Параметри		Виміри					
		1		2		3	
		Термо- е. р. с.	$\Delta t,$ $^\circ\text{C}$	Термо- е. р. с.	$\Delta t,$ $^\circ\text{C}$	Термо- е. р. с.	$\Delta t,$ $^\circ\text{C}$
Значення термо-е. р. с. на поверхні циліндра та величини перевищення температури над тем- пературою навколиш- нього середовища Δt	1						
	4						
	7						
	10						
	14						
	20						
	23						
	26						
	29						
	32						
$\Delta t_{cp}, \text{ }^\circ\text{C}$							
$t_c, \text{ }^\circ\text{C}$							
$t_m, \text{ }^\circ\text{C}$							
$N, \text{ Вт}$							
$\alpha_0, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$							
Nu							
Pr							
Gr							
$\alpha_p, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$							

8. Визначити кількість тепла Q_κ , передане конвекцією, за виразом:

$$Q_\kappa = Q - Q_l,$$

де Q – повна кількість тепла, що виділяється всередині труби і передається до зовнішнього середовища шляхом конвекції та випромінювання. Визначається за потужністю, яку споживає електронагрівач труби, тобто $Q = N$.

9. За відомим значенням Q_k визначити експериментальне значення коефіцієнта тепловіддачі:

$$\alpha_0 = \frac{Q_k}{F(t_c - t_2)} = \frac{Q_k}{\pi d l \Delta t_{cp}}.$$

Результати розрахунків занести до таблиці протоколу вимірювань.

10. Визначити коефіцієнт тепловіддачі за критеріальними рівняннями. Розрахунки провести для одного режиму у таких послідовностях:

– розрахувати визначальну температуру за виразом $t_m = \frac{t_c + t_2}{2}$;

– за відомим значенням t_m за табл. Б.3 «Фізичні параметри сухого повітря при 750 мм рт. ст.» (додаток Б) знайти фізичні параметри сухого повітря ν , λ і Pr та обчислити критерій Гросгофа;

– за формулою (6.1) розрахувати критерій Нусельта, а потім визначити коефіцієнт тепловіддачі α_p за виразом:

$$\alpha_p = \frac{Nu_m}{d} \cdot \lambda.$$

11. Порівняти розрахункове значення коефіцієнта тепловіддачі α_p з експериментальним α_0 для вибраного режиму. Зробити висновки.

Контрольні питання

1. Охарактеризувати конвективний теплообмін.
2. Записати критерії Нусельта і Гросгофа.
3. Дати визначення коефіцієнта тепловіддачі.
4. Яка температура називається визначальною?
5. З якою метою труба теплоізолюється з торців?
6. Яка мета опису процесу тепловіддачі в критеріальній формі?
7. Від яких фізичних властивостей газу залежить коефіцієнт тепловіддачі?

Література: [1, с. 196...199;201...204].

2 КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТА ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Відповідно до положення про проведення поточного та семестрового контролю викладач здійснює перевірку та оцінювання:

- систематичності та активності роботи студента на аудиторних заняттях;
- відвідування студентом аудиторних занять, консультацій;
- розуміння та засвоєння матеріалу, набутих навичок і вмінь самостійно

опрацьовувати матеріал, працювати з літературою, а також умінь усно чи письмово подавати матеріал у вигляді презентацій, відповідей на питання тощо. Розрахунок здобутків студента під час виконання лабораторних робіт у 100-бальній системі оцінювання проводять таким чином.

Загальний бал за виконання лабораторних робіт розраховується як сума балів за відвідування та підготовку до лабораторних занять і балів, отриманих студентами під час контролю знань під час лабораторних робіт.

Відвідування лабораторних занять і підготовка до них оцінюється в два бали за кожне заняття.

Контроль знань студента під час захисту лабораторних робіт проводиться шляхом його опитуванням під час консультацій за контрольними питаннями, що наведені в кінці кожної лабораторної роботи. Контроль знань студентів оцінюється за п'ятибальною шкалою.

П'ять балів отримує студент, який виявив особливі творчі здібності, уміє самостійно здобувати знання, без допомоги викладача знаходить та опрацьовує необхідну інформацію, уміє використовувати набуті знання і вміння для прийняття рішень у нестандартних ситуаціях, переконливо аргументує відповіді, самостійно розкриває власні здібності та нахили.

Чотири бали отримує студент, який уміє зіставляти, узагальнювати, систематизувати інформацію під керівництвом викладача; у цілому самостійно застосовувати її на практиці; контролювати власну діяльність; виправляти помилки, серед яких є суттєві, добирати аргументи для підтвердження думок.

Три бали отримує студент, який відтворює значну частину теоретичного матеріалу, виявляє знання та розуміння основних положень; за допомогою викладача може аналізувати навчальний матеріал, виправляти помилки, серед яких є значна кількість суттєвих.

Два бали отримує студент, якщо він володіє матеріалом на рівні окремих фрагментів, що становлять незначну частину навчального матеріалу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алабовский А. Н. Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие / А. Н. Алабовский, И. А. Недужий – [3-е изд., перераб. и доп.] – К. : Выща шк., 1990. – 225 с.
2. Беляев Н. М. Основы теплопередачи : учебник. / Н. М. Беляев. – К. : Выща шк.; Головное изд-во, 1989. – 343 с.
3. Буляндра О. Ф. Технічна термодинаміка : підруч. для студ. енерг. спец. вищ. навч. закл./ О. Ф. Буляндра. – 2-ге вид., випр. – К. : Техніка, 2006. – 320 с.
4. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – М. : Высшая школа, 1980. – 496 с.

Зразок оформлення титульної сторінки

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ І ТРАНСПОРТУ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ

ЖУРНАЛ

**лабораторних робіт з навчальної дисципліни
«Теоретичні основи теплотехніки»**

Виконав: _____
Група _____
Шифр _____
Перевірив: _____

Кременчук 20__

Довідкові таблиці

Таблиця Б.1 – Градувальна таблиця стандартної термопари ТХК (хромель-копель) при температурі холодного спаю $t_x = 0$ °С та температурі t_r робочого спаю. Значення термо-е. р. с. подані у мВ

$t^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-40	-2,50	-2,56	-2,62	-2,68	-2,74	-2,81	-2,87	-2,93	-2,99	-3,05
-30	-1,89	-1,92	-2,01	-2,07	-2,13	-2,20	-2,26	-2,32	-2,38	-2,44
-20	-1,27	-1,33	-1,39	-1,46	-1,52	-1,58	-1,64	-1,70	-1,77	-1,83
-10	-0,64	-0,70	-0,77	-0,83	-0,89	-0,96	-1,02	-1,08	-1,14	-1,21
< 0	0	-0,06	-0,13	-0,19	-0,26	-0,32	-0,38	-0,45	-0,51	-0,58
> 0	0	0,06	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,58	1,65	1,71	1,78	1,85	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,39	2,46	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,01	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,10	4,12	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,19	5,26	5,34	5,41
80	5,48	5,55	5,63	5,70	5,77	5,85	5,92	5,99	6,06	6,14
90	6,21	6,28	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,88
100	6,95	7,02	7,10	7,17	7,25	7,32	7,39	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,76	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,36
120	8,43	8,51	8,58	8,66	8,73	8,81	8,88	8,96	9,03	9,11
130	9,18	9,26	9,33	9,41	9,48	9,56	9,63	9,71	9,78	9,86
140	9,93	10,01	10,08	10,16	10,23	10,31	10,39	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,84	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,01	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,56	12,64	12,71	12,79	12,87	12,95
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,35	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,09	14,17	14,25	14,33	14,41	14,50	14,58
200	14,66	14,74	14,82	14,91	14,99	15,07	15,15	15,23	15,32	15,40
210	15,48	15,56	15,64	15,73	15,81	15,89	15,97	16,05	16,14	16,22
220	16,30	16,38	16,46	16,55	16,63	16,71	16,79	16,87	16,95	17,04
230	17,12	17,20	17,29	17,37	17,45	17,54	17,62	17,70	17,78	17,87
240	17,95	18,03	18,11	18,20	18,28	18,36	18,44	18,52	18,61	18,69

Таблиця Б.2 – Психрометричні таблиці

15				15,5				16				16,5			
t_M °C	t_P °C	φ ,%	P_n мб	t_M °C	t_P °C	φ ,%	P_n мб	t_M °C	t_P °C	φ ,%	P_n мб	t_M °C	t_P °C	φ ,%	P_n мб
15	15	100	17	15,5	15,5	100	17,6	16	16	100	18,2	16,5	16,5	100	18,8
14,5	14,1	95	16,1	15	14,6	94	16,6	15,5	15,1	95	17,1	16	15,7	95	17,8
14	13,2	89	15,2	14,5	13,7	89	15,6	15	14,2	89	16,2	15,5	14,8	89	16,8
13,5	12,3	84	14,3	14	12,8	84	14,8	14,5	13,3	84	15,3	15	13,8	84	15,8
13	11,3	79	13,4	13,5	11,8	78	13,8	14	12,4	79	14,4	14,5	12,9	79	14,5
12,5	10,3	74	12,5	13	10,9	74	13	13,5	11,3	74	13,4	14	12	74	14
12	9,2	68	11,6	12,5	9,8	69	12,1	13	10,3	69	12,5	13,5	10,9	69	13
11,5	8	63	10,7	12	8,6	64	11,2	12,5	9,3	64	11,7	13	9,8	64	12,1
11	6,8	58	9,9	11,5	7,4	59	10,3	12	8,1	59	10,8	12,5	8,8	60	11,3
10,5	5,6	54	9,1	11	6,2	54	9,5	11,5	6,9	54	9,9	12	7,6	55	10,4
10	4,3	49	8,3	10,5	5	49	8,7	11	5,6	50	9,0	11,5	6,2	51	9,5
9,5	2,7	44	7,4	10	3,4	44	7,8	10,5	4,2	45	8,2	11	5	46	8,7
9	1,3	39	6,7	9,5	1,9	40	7	10	2,8	41	7,4	10,5	3,6	42	7,9
8,5	-0,5	35	5,9	9	0,4	36	6,3	9,5	1,2	36	6,7	10	1,9	37	7
8	-2,5	30	5,1	8,5	-1,4	31	5,5	9	-0,6	32	5,8	9,5	0,2	33	6,2
7,5	-4,7	25	4,3	8	-3,6	27	4,7	8,5	-2,5	28	5,1	9	-1,4	29	5,5
7	-7,1	21	3,6	7,5	-6	22	3,9	8	-4,8	24	4,3	8,5	-3,6	25	4,7

17				17,5				18				18,5			
t_M °C	t_P °C	φ ,%	P_n мб	t_M °C	t_P °C	φ ,%	P_n мб	t_M °C	t_P °C	φ ,%	P_n мб	t_M °C	t_P °C	φ ,%	P_n мб
17	17	100	19,4	17,5	17,5	100	20	18	18	100	20,6	18,5	18,5	100	21,3
16,5	16,2	95	18,4	17	16,7	95	19	17,5	17,2	95	19,6	18	17,7	95	20,2
16	15,3	90	17,4	16,5	15,9	90	18	17	16,4	90	18,6	17,5	16,9	90	19,2
15,5	14,4	85	16,4	16	15	85	17	16,5	15,4	85	17,5	17	16	85	18,2
15	13,5	80	15,3	15,5	14	80	16	16	14,6	81	16,6	16,5	15,2	81	17,2
14,5	12,4	74	14,3	15	13	75	15	15,5	13,6	75	15,6	16	14,1	76	16,2
14	11,5	70	13,5	14,5	12,1	71	14,1	15	12,6	71	14,6	15,5	13,2	71	15,2
13,5	10,4	65	12,5	14	11	66	13,1	14,5	11,7	67	13,7	15	12,2	67	14,2
13	9,3	61	11,6	13,5	9,9	61	12,2	14	10,5	62	12,7	14,5	11,2	62	13,4
12,5	8,4	56	10,7	13	8,8	57	11,3	13,5	9,4	57	11,8	14	10	58	12,3
12	7,2	51	9,9	12,5	7,6	52	10,4	13	8,2	53	10,9	13,5	8,9	54	11,4
11,5	5,6	47	9,1	12	6,4	48	9,6	12,5	7,1	49	10,1	13	7,7	49	10,5
11	4,3	43	8,3	11,5	5	44	8,7	12	5,8	45	9,2	12,5	6,4	45	9,6
10,5	2,9	39	7,5	11	3,6	40	7,9	11,5	4,3	40	8,3	12	5,1	41	8,8
10	1,1	34	6,6	10,5	2,1	36	7,1	11	2,9	36	7,5	11,5	3,6	37	7,9
9,5	-0,7	30	5,8	10	0,2	31	6,2	10,5	1,3	33	6,7	11	2,1	33	7,1
9	-2,7	26	5	9,5	-1,7	27	5,4	10	-0,7	28	5,8	10,5	0,4	30	6,3

19				19,5				20				20,5			
t _M °C	t _p °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _p °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _p °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _p °C	φ,%	P _n мб
19	19	100	22	19,5	19,5	100	22,7	20	20	100	23,4	20,5	20,5	100	24,1
18,5	18,2	95	20,9	19	18,7	95	21,6	19,5	19,2	95	22,3	20	19,7	95	23
18	17,4	90	19,8	18,5	17,9	90	20,5	19	18,4	90	21,1	19,5	18,9	90	21,8
17,5	16,5	85	18,8	18	17	85	19,4	18,5	17,6	86	20,1	19	18,1	86	20,7
17	15,6	80	17,7	17,5	16,2	80	18,4	18	16,7	81	19	18,5	17,3	82	19,7
16,5	14,7	76	16,7	17	15,2	76	17,3	17,5	15,9	77	18	18	16,4	77	18,6
16	13,7	71	15,7	16,5	14,3	72	16,3	17	14,9	72	16,9	17,5	15,5	73	17,6
15,5	12,8	67	14,8	16	13,3	67	15,3	16,5	13,9	68	15,9	17	14,5	68	16,5
19				19,5				20				20,5			
t _M °C	t _p °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _p °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _p °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _p °C	φ,%	P _n мб
15	11,8	63	13,8	15,5	12,4	63	14,4	16	12,9	64	14,9	16,5	13,5	64	15,4
14,5	10,7	59	12,9	15	11,3	59	13,4	15,5	12	60	14	16	12,5	60	14,5
14	9,5	54	11,9	14,5	10,3	55	12,5	15	10,9	56	13	15,5	11,5	56	13,6
13,5				14	9	51	11,5	14,5	9,8	52	12,1	15	10,4	52	12,6
13	7,1	46	10,1	13,5	7,8	47	10,6	14	8,5	46	11,1	14,5	9,3	49	11,7
12,5	5,8	42	9,2	13	6,5	43	9,7	13,5	7,3	44	10,2	14	8	44	10,7
12	4,5	38	8,4	12,5	5,1	39	8,8	13	5,6	40	9,3	13,5	6,7	41	9,8
11,5	2,9	34	7,5	12	3,8	35	8	12,5	4,5	36	8,4	13	5,3	37	8,9
11	1,3	30	6,7	11,5	2,1	31	7,1	12	3	32	7,6	12,5	3,8	33	8
10,5	-0,5	26	5,8	11	0,2	27	6,2	11,5	1,3	29	6,7	12	2,3	30	7,2
								11	-0,5	25	5,9	11,5	0,4	26	6,3
								10,5	-2,7	21	5	11	-1,4	23	5,5

21				21,5				22				22,5			
t _M °C	t _p °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _p °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _p °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _p °C	φ,%	P _n мб
21	21	100	24,9	21,5	21,5	100	25,6	22	22	100	26,4	22,5	22,5	100	27,2
20,5	20,2	95	23,7	21	20,8	96	24,5	21,5	21,2	95	25,2	22	21,7	96	26
20	19,5	91	22,6	20,5	20	91	23,3	21	20,4	91	24	21,5	21	91	24,8
19,5	18,6	86	21,4	20	19,2	87	22,2	20,5	19,7	87	22,9	21	20,2	87	23,6
19	17,7	82	20,3	19,5	18,3	82	21	20	18,8	82	21,7	20,5	19,4	83	22,5
18,5	16,9	78	19,3	19	17,4	78	19,9	19,5	18	76	20,6	20	18,5	78	21,3
18	16	73	18,2	18,5	16,6	74	18,9	19	17,1	74	19,5	19,5	17,7	74	20,2
17,5	15,1	69	17,2	18	15,7	70	17	18,5	16,2	70	18,4	19	16,8	70	19,1
17	14,1	65	16,1	17,5	14,7	65	16,7	18	15,3	66	17,4	18,5	15,9	66	18
16,5	13,1	61	15,1	17	13,7	61	15,7	17,5	14,3	62	16,3	18	15	63	17
16	12,1	57	14,1	16,5	12,7	57	14,7	17	13,3	58	15,3	17,5	13,9	58	15,9
15,5	11,1	53	13,2	16	11,7	54	13,7	16,5	12,3	54	15,3	17	12,9	55	14,9
15	9,9	49	12,2	15,5	10,5	50	12,7	16	11,2	50	13,3	16,5	11,9	51	13,9

14,5	8,6	42	11,2	15	9,4	46	11,8	15,5	10	47	12,3	16	10,7	47	12,9
14	7,4	41	10,3	14,5	8,1	42	10,8	15	8,9	43	11,4	15,5	9,5	44	11,9
13,5	6,1	38	9,4	14	6,8	39	9,9	14,5	7,6	39	10,4	15	8,4	40	11
13	4,6	34	8,5	13,5	5,5	35	9	14	6,2	36	9,5	14,5	7	37	10
12,5	3	31	7,6	13	4	32	8,1	13,5	4,8	33	8,6	14	5,6	33	9,1
12	1,5	27	6,8	12,5	2,3	28	7,2	13	3,2	29	7,7	13,5	4,1	30	8,2
11,5	-0,5	24	5,9	12	0,6	25	6,4	12,5	1,5	26	6,8	13	2,5	27	7,3
												12,5	0,6	24	6,4
												12	-1,2	21	5,6
												11,5	-3,6	17	4,7
												11	-6	14	3,9

23				23,5				24				24,5			
t _M °C	t _P °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _P °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _P °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _P °C	φ,%	P _n мб
23	23	100	28,1	23,5	23,5	100	28,9	24	24	100	29,8	24,5	24,5	100	30,7
22,5	22,5	95	26,8	23	22,8	96	27,7	23,5	23,2	96	28,5	24	23,8	96	29,4
22	21,5	91	25,6	22,5	22	91	26,4	23	22,5	92	27,3	23,5	23	92	28,1
21,5	20,7	87	24,4	22	21,2	87	25,2	22,5	21,7	87	26	23	22,3	88	26,9
21	19,9	83	23,2	21,5	20,4	83	24	22	21	83	24,8	22,5	21,5	83	25,6
20,5	19,1	79	22,1	21	19,6	79	22,8	21,5	20,2	79	23,6	22	20,7	79	24,4
23				23,5				24				24,5			
t _M °C	t _P °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _P °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _P °C	φ,%	P _n мб	t _M °C	t _P °C	φ,%	P _n мб
20	18,2	74	20,9	20,5	18,8	75	21,7	21	19,3	75	22,4	21,5	19,9	76	23,2
19,5	17,4	70	19,8	20	17,9	71	20,5	20,5	18,5	71	21,3	21	19	72	22
19	16,4	67	18,7	19,5	17	67	19,4	20	17,6	67	20,1	20,5	18,2	68	20,9
18,5	15,5	63	17,6	19	16,1	63	18,3	19,5	16,7	64	19	20	17,3	64	19,7
18	14,6	59	16,6	18,5	15,1	60	17,2	19	15,8	60	17,9	19,5	16,4	61	18,6
17,5	13,5	55	15,5	18	14,7	56	16,2	18,5	14,8	56	16,8	19	15,4	57	17,5
17	12,5	52	14,5	17,5	13,1	52	15,1	18	13,8	53	15,8	18,5	14,4	53	16,4
16,5	11,4	48	13,5	17	12,1	49	14,1	17,5	12,7	49	14,7	18	13,4	50	15,4
16	10,3	44	12,5	16,5	11	45	13,1	17	11,7	46	13,7	17,5	12,3	47	14,3
15,5	9	41	11,5	16	9,8	42	12,1	16,5	10,5	43	12,7	17	11,2	43	13,3
15	7,8	38	10,6	15,5	8,5	38	11,1	16	9,3	39	11,7	16,5	10	40	12,3
14,5	6,4	34	9,6	15	7,3	35	10,2	15,5	8	36	10,7	16	8,8	37	11,3
14	5	31	8,7	14,5	5,8	32	9,2	15	6,7	33	9,8	15,5	7,4	34	10,3
13,5	3,4	28	7,8	14	4,3	29	8,3	14,5	5,1	30	8,8	15	6,1	31	9,4
13	1,7	25	6,9	13,5	2,7	26	7,4	14	3,6	27	7,9	14,5	4,5	27	8,4
12,5	-0,2	21	6	13	0,9	22	6,5	13,5	1,9	23	7	14	2,9	24	7,5
12	-2,2	19	5,2	12,5	-1,2	19	5,6	13	0	20	6,1	13,5	1,1	21	6,6
11,5	-4,7	15	4,3	12	-3,3	17	4,8	12,5	-2,2	17	5,2	13	-0,9	19	5,7

1 мб = 100 Па = 0,1 кПа = 0,75 мм рт. ст.

Таблиця Б.2. – Таблиця числових значень коефіцієнтів теплопровідності та температуропровідності при різних густинах, температурах і теплоємностях					
Найменування матеріалу	ρ , кг/м ³	t , °С	λ , Вт/(м·К)	c , кДж/(кг·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с
1	2	3	4	5	6
Азбест листовий	770	30	0,1163	0,816	0,186
Асфальт	2110	20	0,6978	2,09	0,156
Бетон	2300	20	0,279	1,13	0,622
Глина вогнетривка	1850	450	1,035	1,089	0,051
Дуб (поперек волокон)	800	20	0,207	1,758	0,147
Земля волога	1700	17	0,657	2,01	0,192
Кам'яне вугілля	1400	20	0,186	1,31	0,103
Цегла червона	1800	0	0,768	0,879	-
Цегла вогнетривка	1900	0	0,814	0,837	0,514
Лід	920	0	2,25	2,26	1,08
Мінеральна вата	200	50	0,0465	0,921	0,253
Накип котельний	1000 – 2500	100	1,314 - 3,14	-	-
Пісок сухий	1500	20	0,326	0,795	2,74
Пробкова пластина	200	27	0,0419	1,884	0,117
Гума тверда	1200	0	0,169	1,382	0,098
Цукор-пісок	1600	0	0,582	1,256	0,278
Слюда	290	20	0,582	0,879	2,28
Сніг	560	-	0,465	2,09	0,4
Скло	2500	20	0,744	0,67	0,444
Скляна вата	200	0	0,037	0,67	

1	2	3	4	5	6
Шлак котельний	1000	0	0,29	0,754	-
Шлакова вага	250	100	0,0698	-	-
Штукатурка вапняна	1600	0	0,698	0,837	-
Алюміній	2670	0	204	0,921	86,7
Латунь	8600	0	85	0,377	33,8
Мідь	8800	0	384	0,381	112,5
Нікель	9000	20	58	0,461	17,8
Олово	7230	0	64	0,221	41,1
Ртуть	13600	0	7,9	0,138	4,3
Свинець	11400	0	35	0,13	23,6
Срібло	10500	0	458	0,234	170
Сталь вуглецева	7900	20	45	0,461	14,7
Чавун	1220	20	63	0,502	17,0
Сажа лампова	165	40	0,166	-	-
Вода	999,9	0	0,5513	4,212	0,131
Повітря (сухе)	1,293	0	0,0244	1,005	18,8
Кисень	1,429	0	0,0247	0,915	18,8
Азот	1,25	0	0,0243	1,03	18,9
Водень	0,0899	0	0,1721	14,192	135,0
Окис вуглецю	1,25	0	0,0233	1,039	17,9

Таблиця Б.3 – Фізичні параметри сухого повітря при 750 мм рт. ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p,$ Дж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$a \cdot 10^2,$ м ² /год	$\nu \cdot 10^6$ м ² /с	Pr
0	1,293	1005	2,44	6,77	13,28	0,707
10	1,247	1005	2,51	7,22	14,16	0,705
20	1,205	1005	2,59	7,71	15,06	0,703
30	1,165	1005	2,67	8,23	16,00	0,701
40	1,128	1005	2,76	8,75	16,96	0,699
50	1,093	1005	2,82	9,26	17,95	0,698
60	1,060	1005	2,90	9,79	18,97	0,696
70	1,028	1009	2,97	10,28	20,02	0,694
80	1,000	1009	3,05	10,87	21,09	0,692
90	0,972	1009	3,13	11,48	22,10	0,690
100	0,946	1009	3,21	12,11	23,13	0,688
120	0,898	1009	3,34	13,26	25,45	0,686
140	0,854	1013	3,49	14,52	27,80	0,684
160	0,815	1017	3,64	15,80	30,09	0,682
180	0,779	1022	3,78	17,10	32,49	0,681
200	0,746	1026	3,93	18,49	34,85	0,680

Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Теоретичні основи теплотехніки» для студентів денної та заочної форм навчання зі спеціальності 133 – Галузеве машинобудування (у тому числі скорочений термін навчання) освітнього ступеня «бакалавр»

Укладач к. т. н., доц. Е. С. Клімов

Відповідальний за випуск доц. кафедри автомобілів і тракторів С. М. Черненко

Підп. до др. _____ . Формат 60×84 1/16. Папір тип. Друк ризографія.

Ум. друк. арк. _____. Наклад _____ прим. Зам. № _____. Безкоштовно.

Видавничий відділ
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600