

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КРАСНОАРМІЙСЬКИЙ ІНДУСТРІАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО САМОСТІЙНОГО ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ,
ЛАБОРАТОРНИХ І ІНДИВІДУАЛЬНИХ РОБІТ З КУРСУ
«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ»

(для студентів за напрямком підготовки 6.050502 «Інженерна механіка»
денної та заочної форм навчання)

Розглянуто на засіданні кафедри
«Електромеханіки і автоматики»
Протокол № 9 від 23 лютого 2011 р.

Затверджено на засіданні
учбово-видавничої ради ДонНТУ
Протокол №__ від " __ " _____ р.

Красноармійськ - 2011

УДК 536.7+536.2

Методичні вказівки до самостійного вивчення дисципліни, лабораторних і індивідуальних робіт з курсу «Теоретичні основи теплотехніки» (для студентів за напрямком підготовки 6.050502 «Інженерна механіка»). Укладачі.: Триллер Є.А., Петелін Е.А., Надєєв Є.І., Алтухова Т.В. - Красноармійськ: КП ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – 86 с.

Наведені теоретичні відомості та методичні вказівки щодо курсу «Теоретичні основи теплотехніки», опис лабораторних робіт та завдання на виконання індивідуальної контрольної роботи, для студентів денної та заочної форм навчання.

Укладачі: Є.А. Триллер, канд. техн. наук
Е.А. Петелін, канд. техн. наук
Є.І. Надєєв, ст. викл.
Т.В. Алтухова, інж.

Рецензент: В.Б. Гого, д. т. н.

Відповідальний за випуск: Є.А. Триллер, канд. техн. наук

© Є.А. Триллер, Е.А. Петелін, Є.І. Надєєв, Т.В. Алтухова
Красноармійськ, КП ДВНЗ «ДонНТУ», 2011

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Методичні вказівки до самостійного вивчення дисципліни.	5
Розділ 1. Параметри газу. Рівняння стану. Суміш ідеальних газів. Реальні гази.	5
Розділ 2. Перший закон термодинаміки. Теплоємність газів. Ентропія. Термодинамічні процеси ідеальних газів.	7
Розділ 3. Другий закон термодинаміки.	9
Розділ 4. Водяний пар. Вологе повітря.	10
Розділ 5. Дроселювання газів і парів.	13
Розділ 6. Машини для стиску й розширення газу. Цикли теплових двигунів. Цикли паросилових установок. Цикли холодильних установок.	13
Розділ 7. Основні положення теплопровідності. Теплопровідність при стаціонарному режимі й граничних умовах першого й третього роду. Коефіцієнт теплопередачі.	17
Розділ 8. Конвективний теплообмін. Конвективний теплообмін у змушеному й вільному потоці рідини. Теплообмін при зміні агрегатного стану речовини. Теплообмін випромінюванням. Теплообмінні апарати.	19
ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ	24
Лабораторна робота №1	24
Лабораторна робота №2.	33
Лабораторна робота № 3	45
Лабораторна робота № 4	55
Лабораторна робота №5	66
ІНДИВІДУАЛЬНА КОНТРОЛЬНА РОБОТА	76
ЛІТЕРАТУРА	81
ДОДАТОК 1	82
ДОДАТОК 2	86

ВСТУП

Курс «Теоретичні основи теплотехніки» відноситься до нормативних навчальних дисциплін з циклу дисциплін професійної та практичної підготовки для студентів спеціальності 6.050502 «Інженерна механіка».

Цей курс являється фундаментом для подальшого вивчення цілого циклу спеціальних дисциплін.

Основна мета курсу – надати студентам методичні рекомендації щодо вивчення основних теоретичних положень з теплотехніки, закріпити їх при виконанні лабораторних робіт та навчити використовувати при розв’язанні індивідуальних завдань. Методичні вказівки також спрямовані на ознайомлення студентів з методикою проведення нескладних теплотехнічних експериментів.

У методичних вказівках наведена інформація про розділи курсу, які потрібно засвоїти студентам, а також посилання на літературні джерела, в яких викладено навчальний матеріал. У методичних вказівках приводяться опис і керівництво до виконання лабораторних робіт, завдання до індивідуальної роботи. При підготовці до співбесіди з викладачем, що веде лабораторний практикум, потрібно: засвоїти основи теорії щодо виконуваної роботи, вивчити пристрій експериментальної установки, методику визначення шуканих величин та залежностей, підготувати відповіді на контрольні запитання.

Методичні вказівки до самостійного вивчення дисципліни.

Розділ 1. Параметри газу. Рівняння стану. Суміш ідеальних газів. Реальні гази.

1. Основні термодинамічні параметри стану газу [1, с. 6-9, 2, с. 11-15].
2. Стан тел. Термодинамічна система. Процеси [2, с. 15-18].
3. Теплота й робота [2, с. 18-20].
4. Рівняння стану ідеальних газів [1, с. 18-23, 2, с. 23-27].
5. Суміш ідеальних газів [1, с. 23-30, 2, с. 30-35].
6. Властивості реальних газів [1, с. 30-32, 2, с. 37-39].
7. Рівняння стану Ван-Дер-Ваальса [1, с. 32-35, 2, с. 39-47].

Запитання для самоконтролю

1. Які величини називаються термодинамічними параметрами?
2. Які термодинамічні параметри відносяться до основних?
3. У чому полягає відмінність між абсолютним і манометричним (надлишковим) тиском?
4. Що називається абсолютною температурою?
5. Що називається рівнянням стану?
6. Що зображує рівняння стану ідеальних газів у тривісній системі координат p, v, T ?
7. Що називається рівноважним станом?
8. Що таке термодинамічні процеси і як вони протікають?
9. Що називається термодинамічною системою?
10. Дати визначення гомогенної й гетерогенної системам.
11. Що називається функцією стану?
12. Дати визначення круговому процесу (циклу).
13. Які існують форми передачі енергії від одних тіл до інших?

14. Для чого вводиться в технічну термодинаміку поняття про ідеальний газ?
15. Закон Бойля-Мариотта й Гей-Люссака. Його визначення й рівняння.
16. Що називається молекулярною масою газу?
17. Характеристичне рівняння стану для ідеального газу.
18. На яких законах заснований вивід рівняння стану Клапейрона?
19. Рівняння Клапейрона для будь-якої кількості газу.
20. Розмірність газової постійної і її фізичний зміст.
21. Що таке газова суміш?
22. Що називається парціальним тиском?
23. Що називається парціальним, або приведеним, об'ємом?
24. Яка існує залежність між питомим об'ємом, щільністю, молекулярною масою й газовою постійною?
25. Як проводиться перерахування масового состава в об'ємний і об'ємного в масовий?
26. Як визначається газова постійна по масових і об'ємних частках?
27. Як визначається парціальний тиск газу в суміші по масових і об'ємних частках?
28. Як визначається середня молекулярна маса суміші газів?
29. Чим відрізняються реальні гази від ідеальних?
30. Що називається коефіцієнтом стискальності?
31. Що покладене в основу виводу рівняння Ван-Дер-Ваальса?
32. Яка величина називається внутрішнім тиском газу?
33. Проведіть дослідження рівняння Ван-Дер-Ваальса.
34. Поясніть p_v -діаграму реальної речовини.
35. Які точки розташовуються на нижній і верхній прикордонних кривих?
36. При яких умовах можна перетворювати гази в рідкий стан?

**Розділ 2. Перший закон термодинаміки. Теплоємність газів. Ентропія.
Термодинамічні процеси ідеальних газів.**

1. Закон збереження й перетворення енергії [1, с. 46-48, 2, с. 52-54].
2. Внутрішня енергія системи й ідеального газу [1, с. 48-51, 2, с. 54-56].
3. Робота й теплота. Ентальпія. [1, с. 51-59, 2, с. 56-67].
4. Теплоємність, основні визначення. Масова, об'ємна й мольна теплоємності газів [1, с. 59-60, 2, с. 69-70].
5. Теплоємність при постійному об'ємі й постійному тиску. Молекулярно-кінетична теорія [1, с. 60-64, 2, с. 70-73].
6. Істинна й середня теплоємності. Відношення теплоємностей c_p і c_v [1, с. 64-69, 2, с. 73-78].
7. Ентропія. Теплова Ts -діаграма [2, с. 81-85].
8. Ізохорний процес [1, с. 71-72, 2, с. 89-91].
9. Ізобарний процес [1, с. 72-74, 2, с. 91-93].
10. Ізотермічний процес [1, с. 74-76, 2, с. 93-95].
11. Адіабатний процес [1, с. 76-78, 2, с. 95-98].
12. Політропні процеси [1, с. 78-81, 2, с. 98-102].

Запитання для самоконтролю

1. Що розуміється під внутрішньою енергією ідеального й реального газів?
2. Від яких параметрів стану залежить внутрішня енергія реального й ідеального газів?
3. Чи є внутрішня енергія функцією стану або процесу?
4. Чому рівна зміна внутрішньої енергії в круговому процесі?
5. Що зображує площу під кривою процесу в pV -діаграмі?
6. Визначення оборотного й необоротного процесів.

7. Які ознаки оборотних процесів?
8. Яка робота газу більше: в оборотному або необоротному процесі й чому?
9. Чи можна зобразити графічно оборотний і необоротний процеси?
10. Чи можна на практиці здійснити оборотний процес?
11. Формулювання першого закону термодинаміки.
12. Аналітичне вираження першого закону термодинаміки.
13. Що таке ентальпія й у чому її фізичний смисл?
14. Дати визначення масової, об'ємної й мольної теплоємкостям.
15. У яких одиницях вимірюються теплоємності?
16. Що таке теплоємність при постійному обсязі й теплоємність при постійному тиску?
17. Чому теплоємність газу при постійному тиску завжди більше теплоємності газу при постійному об'ємі?
18. Дати визначення середньої теплоємності.
19. Що таке істинна теплоємність?
20. Написати рівняння кількості теплоти, виражене через середню теплоємність.
21. Пояснити величину k . Як вона визначається?
22. Як визначається q_v і q_p по таблицях теплоємкостей?
23. Написати рівняння масової, об'ємної й мольної теплоємкостей газових сумішей.
24. Чим відрізняються теплоємності ідеальних і реальних газів?
25. Як визначити середню теплоємність в інтервалі від t_1 до t_2 , користуючись таблицями теплоємкостей від 0 до t °C?
26. Яка функція називається ентропією?
27. Що зображує площу під кривою процесу в Ts -діаграмі?
28. Дати визначення основним термодинамічним процесам.
29. Як графічно зображуються на pV -діаграмі ізохора, ізобара, ізотерма й адіабата?

30. Написати рівняння основних процесів.
31. Написати формули співвідношень між параметрами p , v і T для кожного процесу.
32. Пояснити збільшення температури при розширенні газу в ізобарному процесі.
33. Довести, що в ізобарному процесі теплота дорівнює зміні ентальпії.
34. Написати формули роботи зміни об'єму газу для кожного процесу.
35. Написати формули розташовуваної корисної роботи для кожного процесу.
36. Чому в адіабатному процесі розширення тіла температура убуває, а при стиску збільшується?
37. Який процес називається політропним?
38. При якій умові основні процеси ідеального газу будуть політропними?
39. Написати рівняння політропи й указати, у яких межах змінюється показник політропи.
40. Який показник політропи для основних процесів?

Розділ 3. Другий закон термодинаміки.

1. Сутність другого закону термодинаміки [1, с. 84-86, 2, с. 107-109].
2. Оборотні й необоротні процеси [1, с. 86-89].
3. Кругові термодинамічні процеси або цикли [1, с. 89-90, 2, с. 109-110].
4. Термічний к. к. д. і холодильний коефіцієнт циклів [1, с. 90-93, 2, с. 110-111].
5. Прямий цикл Карно [1, с. 93-93, 2, с. 111-114].
6. Зворотний цикл Карно [1, с. 93-94, 2, с. 114-116].
7. Ентропія. Зміна ентропії в оборотних і необоротних процесах [1, с. 95-98, 2, с. 128-131].

8. Зростання ентропії й деградація енергії [1, с. 101-102, 2, с. 123-125].

Запитання для самоконтролю

1. Основні формулювання другого закону термодинаміки.
2. Які потрібні умови для створення безперервного процесу перетворення теплоти в роботу?
3. Що називається круговим процесом, або циклом?
4. Які бувають цикли?
5. Що називається термічним к. к. д.?
6. При яких умовах термічний к. к. д. циклу може дорівнювати одиниці?
7. Опис циклу Карно.
8. Від яких параметрів залежить термічний к. к. д. циклу Карно?
9. Чи може термічний к. к. д. циклу Карно дорівнювати одиниці?
10. Чи можна одержати термічний к. к. д. циклу теплового двигуна більше, ніж термічний к. к. д. циклу Карно?
11. Зворотний цикл Карно.
12. Які машини працюють по зворотному циклу Карно?
13. Що таке холодильний коефіцієнт і як він визначається?
14. Яка зміна ентропії в замкненій системі, якщо в ній протікають оборотні й необоротні процеси?
15. Як визначається максимальна корисна робота джерела роботи?

Розділ 4. Водяний пар. Вологе повітря.

1. Процес паротворення при постійному тиску [1, с. 149-150].
2. $p\nu$ -діаграма водяного пару [1, с. 150-153, 2, с. 174-175].
3. Основні параметри води й водяної пари [1, с. 153-154].

4. Основні параметри сухого насиченого пару [1, с. 154-155, 2, с. 177-179].
5. Основні параметри перегрітого пару [1, с. 155-157, 2, с. 181-182].
6. Основні параметри вологого насиченого пару [1, с. 157-158, 2, с. 179-179].
7. Ts -діаграма водяного пари [1, с. 158-160, 2, с. 184-185].
8. Таблиці водяної пари [1, с. 160-162, 2, с. 185-186].
9. is -діаграма водяного пару [1, с. 162-165, 2, с. 186-188].
10. Основні термодинамічні процеси водяної пари [1, с. 165-170, 2, с. 190-194].
11. Вологе повітря, основні поняття [1, с. 170-170, 2, с. 236-240].
12. Розрахунки основних параметрів вологого повітря [1, с. 170-170].
13. id -діаграма вологого повітря [1, с. 170-173, 2, с. 241-243].

Запитання для самоконтролю

1. Що називається кипінням, паротворенням, випаром?
2. Який процес називають сублімацією й десублімацією?
3. Яку пару називають вологим насиченим, сухим насиченим, перегрітим?
4. Що таке ступінь сухості й ступінь вологості?
5. Зобразити pv -діаграму водяної пари.
6. Які точки розташовуються на верхній і нижній граничних кривих?
7. Що таке критична точка і її параметри?
8. Що називається фазою, фазовим переходом і потрійною точкою?
9. Зобразити фазову pT -діаграму.
10. При яких умовах відбувається процес паротворення?
11. Що таке повна теплота паротворення і її визначення?
12. Ентропія води, вологого, сухого й перегрітого пару.
13. Ts -діаграма водяного пару.

14. Таблиці водяної пари і їх значення.
15. is -діаграма водяного пару.
16. Які методи застосовують для досліджень термодинамічних процесів водяної пари?
17. По яких рівняннях визначають в ізохорному процесі підведену теплоту, зміну внутрішньої енергії, роботу, ступінь сухості?
18. По яких рівняннях визначають зміну внутрішньої енергії, зовнішню роботу, підведену теплоту й ступінь сухості в ізобарному процесі?
19. Як визначають зміну внутрішньої енергії, підведену теплоту й зовнішню роботу в ізотермічному процесі?
20. У чому особливість розрахунків ізотермічного процесу водяної пари в порівнянні з ідеальним газом?
21. Як визначають зовнішню теплоту, зміни внутрішньої енергії й зовнішньої роботи в адіабатному процесі?
22. Зображення основних процесів водяної пари в $p\nu$ -, Ts - і is -діаграмах.
23. Що називають вологим повітрям?
24. Що називають насиченим і ненасиченим вологим повітрям?
25. Що називається абсолютною вологістю?
26. Що називається вологовмістом вологого повітря?
27. У яких межах може змінюватися вологовміст?
28. Що називається відносною вологістю повітря?
29. Що називається температурою точки роси?
30. Як визначають щільність вологого повітря?
31. Як визначають газову постійну вологого повітря?
32. Описати id -діаграму вологого повітря.
33. Які лінії зображуються на id -діаграмі?
34. Як зображуються основні процеси вологого повітря в id -діаграмі?

Розділ 5. Дроселювання газів і парів.

1. Дроселювання газу [1, с. 193-195, 2, с. 218-219].
2. Рівняння процесу дроселювання [2, с. 219-220].
3. Дослідження процесу дроселювання [2, с. 220-225].
4. Одержання низьких температур [1, с. 199-201].
5. Дроселювання водяної пари [1, с. 202-203, 2, с. 225-226].

Запитання для самоконтролю

1. Який процес називається дроселюванням, і де він зустрічається?
2. Які величини змінюються і які залишаються постійними за звуженим отвором?
3. Рівняння адіабатного процесу дроселювання.
4. Чому процес дроселювання не можна назвати ізоентальпним?
5. Як змінюється температура ідеального газу при дроселюванні?
6. Що таке диференціальний і інтегральний ефект дроселювання?
7. Дослідження дроселювання водяної пари по is -діаграмі.
8. Зміна працездатності водяної пари при дроселюванні.

Розділ 6. Машини для стиску й розширення газу. Цикли теплових двигунів. Цикли паросилових установок. Цикли холодильних установок.

1. Процеси стиску в компресорі [1, с. 203-206].
2. Одноступінчастий компресор [1, с. 206-208, 2, с. 245-254].
3. Вплив характеру процесу стиску на величину роботи, затрачуваної на привод компресора [1, с. 208-209].
4. Дійсна індикаторна діаграма компресора [1, с. 209-210].

5. Робота одноступінчастого компресора [1, с. 210-212].
6. Багатоступінчастий компресор [1, с. 212-216, 2, с. 254-257].
7. Цикли поршневих двигунів внутрішнього згорання [1, с. 267-277, 2, с. 259-272].
8. Цикли газотурбінних установок [1, с. 277-286, 2, с. 278-289].
9. Цикл Карно для водяної пари [1, с. 297-299, 2, с. 296-298].
10. Цикл Ренкіна [1, с. 299-302, 2, с. 298-301].
11. Вплив основних параметрів на величину к. к. д. циклу Ренкіна [1, с. 302-305, 2, с. 301-303].
12. Цикл із проміжним перегрівом пари [1, с. 305-306, 2, с. 303-304].
13. Регенеративний цикл паротурбінної установки [1, с. 306-309, 2, с. 304-308].
14. Основи теплофікації [1, с. 312-315, 2, с. 310-312].
15. Цикл повітряної холодильної машини [1, с. 322-324, 2, с. 330-336].
16. Цикл парокомпресорної холодильної установки [1, с. 324-326, 2, с. 336-337].
17. Тепловий насос [1, с. 326-329, 2, с. 340-342].

Запитання для самоконтролю

1. Яка машина називається компресором?
2. Дати опис одноступінчастого компресора.
3. Теоретична індикаторна діаграма одноступінчастого компресора.
4. Які процеси можливі при стиску газу в компресорі?
5. Який процес стиску є найвигіднішим і при якому процесі затрачається найбільша робота?
6. Якими рівняннями визначається робота на привод компресора при ізотермічному, адіабатному й політропному стиску робочого тіла?
7. Чим відрізняється дійсна індикаторна діаграма від теоретичної?

8. Чому не можна одержати газ високого тиску в одноступінчастому компресорі?
9. Що такий шкідливий простір?
10. Дати визначення об'ємного к. к. д.
11. Як впливає шкідливий простір на процес стиску газу?
12. До яких тисків стиску газу застосовують одноступінчастий компресор?
13. Чому застосовують багатоступінчастий компресор?
14. Дати опис багатоступінчастого компресора.
15. Особливості теоретичної індикаторної діаграми багатоступінчастого компресора.
16. При яких умовах здійснюється багатоступінчастий стиск?
17. Що дає багатоступінчастий стиск у порівнянні з одноступінчастим?
18. На які групи діляться поршневі двигуни внутрішнього згоряння?
19. Чим викликано створення газових турбін?
20. Які недоліки є у поршневих двигунів внутрішнього згоряння?
21. Які позитивні сторони газових турбін?
22. Дати опис ГТУ з горінням палива при $p = const$.
23. Дати опис ідеального циклу ГТУ з підведенням теплоти при $p = const$.
24. Описати ідеальний цикл газотурбінної установки з підведенням теплоти при $v = const$.
25. Зрівняти цикли ГТУ.
26. Які методи існують для підвищення к. к. д. ГТУ?
27. Чим відрізняється паротурбінна установка від двигунів внутрішнього згоряння?
28. Цикл Карно для насиченого пару.
29. Чим відрізняється цикл Ренкіна від циклу Карно?
30. Зобразити цикл Ренкіна в $p\nu$ - і Ts -діаграмах.

31. Як визначити термічний к. к. д. і питому витрату пари в циклі Ренкіна?
32. Який вплив початкового тиску пару на термічний к. к. д. циклу Ренкіна?
33. Який вплив початкової температури пару на термічний к. к. д. циклу Ренкіна?
34. Який вплив кінцевого тиску на термічний к. к. д. циклу Ренкіна?
35. Цикл паротурбінної установки із вторинним перегрівом пари.
36. Описати регенеративний цикл паротурбінної установки.
37. Чим вигідний спільний виробіток електроенергії й теплоти?
38. Теплова схема ТЕЦ.
39. Коефіцієнт використання теплоти палива на ТЕЦ.
40. Що таке внутрішній відносний к. к. д. парової турбіни і як він визначається?
41. Як визначається питома корисна робота парової турбіни?
42. З яких необоротних процесів полягає дійсний цикл паротурбінної установки?
43. Як визначається внутрішній відносний к. к. д. насоса й паротурбінної установки?
44. Як визначається ефективний к. к. д. паротурбінної установки?
45. На які групи діляться холодильні установки?
46. Чим відрізняються пароежекторні й абсорбційні холодильні установки від парових компресорних установок?
47. Що таке холодильний коефіцієнт?
48. Дати опис повітряної холодильної установки. Які її недоліки?
49. Дати опис парової компресорної холодильної установки.
50. Зобразити ідеальний цикл парової компресорної холодильної установки в Ts -діаграмі.
51. У яких випадках доцільно застосовувати тепловий насос для опалення будівель?

Розділ 7. Основні положення теплопровідності. Теплопровідність при стаціонарному режимі й граничних умовах першого й третього роду. Коефіцієнт теплопередачі..

1. Температурне поле й градієнт [2, с. 347-349].
2. Основний закон теплопровідності [2, с. 348-350].
3. Коефіцієнт теплопровідності [2, с. 350-352].
4. Теплопровідність через одношарову плоску стінку [2, с. 358-361, 372-375].
5. Теплопровідність через багатшарову плоску стінку [2, с. 361-363, 372-375].
6. Теплопровідність через одношарову циліндричну стінку [2, с. 363-365, 375-377].
7. Теплопровідність через багатшарову циліндричну стінку [2, с. 365-366, 375-377].
8. Критичний діаметр ізоляції [2, с. 377-379].
9. Передача теплоти через ребристу стінку [2, с. 380-382].

Запитання для самоконтролю

1. Назвіть основні випадки теплообміну.
2. Опишіть докладно всі види теплообміну.
3. Що називається конвективним теплообміном?
4. Яка природа променистої енергії й передача теплоти випромінюванням?
5. Які гази випромінюють?
6. Що називається складним теплообміном?
7. Що називається температурним полем? Написати його рівняння.
8. Рівняння температурного поля при стаціонарному режимі.
9. Рівняння одномірного температурного поля.

10. Що називається температурним градієнтом?
11. Що називається коефіцієнтом, теплопровідності?
12. Описати особливості теплопровідності різних речовин.
13. Що називається коефіцієнтом температуропровідності?
14. Що називається коефіцієнтом тепловіддачі?
15. За яким законом змінюється температура в одношаровій плоскій стінці?
16. Від яких величин залежить тепловий потік, переданий теплопровідністю через одношарову плоску стінку?
17. Теплопровідність багатошарової плоскої стінки.
18. Що називається еквівалентним коефіцієнтом теплопровідності?
19. Як визначається температура між шарами в багатошаровій плоскій стінці?
20. Рівняння температурного поля для циліндричної стінки.
21. Теплопровідність через одношарову циліндричну стінку.
22. Який закон зміни температури в циліндричній стінці?
23. Від яких величин залежить теплопровідність одношарової циліндричної стінки?
24. Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності циліндричної стінки.
25. Як визначаються температури між шарами в багатошаровій циліндричній стінці?
26. Що називається теплопередачею?
27. Описати передачу теплоти через стінку.
28. Яким рівнянням описується передача теплоти через стінку?
29. Що називається коефіцієнтом теплопередачі?
30. Що називається повним термічним опором і з яких величин воно складається?
31. Передача теплоти через багатошарову плоску стінку й коефіцієнт теплопередачі для неї.
32. Як визначаються температури поверхонь стінки?

33. Передача теплоти через одношарову циліндричну стінку.
34. Коефіцієнт теплопередачі через одношарову циліндричну стінку.
Дати визначення.
35. Тепловий потік і коефіцієнт теплопередачі через багатшарову циліндричну стінку.
36. Визначення температур внутрішньої й зовнішньої поверхонь циліндричної стінки.
37. Що називається критичною товщиною ізоляції?
38. Що називається критичним діаметром ізоляції і як він визначається?
39. Які потрібні умови, щоб ізоляція зменшувала втрати тепла?
40. У яких випадках застосовують ребристі стінки?
41. Теплопередача й коефіцієнт теплопередачі через ребристу стінку.
42. У яких випадках і за рахунок чого можна інтенсифікувати теплопередавання?
43. Яке існує загальне правило для інтенсифікації теплопередачі?

Розділ 8. Конвективний теплообмін. Конвективний теплообмін у змушеному й вільному потоці рідини. Теплообмін при зміні агрегатного стану речовини. Теплообмін випромінюванням. Теплообмінні апарати.

1. Основи теорії конвективного теплообміну [2, с. 402-403].
2. Фізичні властивості рідин [2, с. 403-404].
3. Режими течії й прикордонний шар [2, с. 404-406].
4. Коефіцієнт тепловіддачі [2, с. 406-408].
5. Середня температура. Визначальна температура. Еквівалентний діаметр [2, с. 427-429].
6. Теплообмін при ламінарному плинні рідини в трубах [2, с. 429-430].

7. Теплообмін при турбулентному плинні рідини в трубах [2, с. 430-431].
8. Теплообмін при плинні рідини уздовж пластини [2, с. 431-432].
9. Теплообмін при поперечному обтіканні одиночної труби [2, с. 432-433].
10. Теплообмін при поперечному обтіканні пучка труб [2, с. 433-436].
11. Тепловіддача при кипінні рідини [2, с. 450-452].
12. Тепловіддача при конденсації пари [2, с. 452-454].
13. Вплив різних факторів на тепловіддачу при конденсації [2, с. 454-455].
14. Загальні відомості про теплове випромінювання [2, с. 458-460].
15. Основний закон поглинання [2, с. 460-461].
16. Основні закони теплового випромінювання [2, с. 461-467].
17. Променистий теплообмін між твердими тілами [2, с. 467-467].
18. Паралельні пластини [2, с. 467-469].
19. Теплообмін випромінюванням між тілами, одне з яких перебуває усередині іншого [2, с. 469-470].
20. Екрани [2, с. 470-471].
21. Променистий теплообмін у котельних топках [2, с. 478-479].
22. Типи теплообмінних апаратів [2, с. 485-486].

Запитання для самоконтролю

1. Що називається конвективним теплообміном?
2. Які розрізняють види конвекції?
3. Гідродинамічний і тепловий прикордонні шари і їх фізичний смисл.
4. Які зустрічаються види руху рідини і їх відмінність?
5. Який механізм передачі теплоти при ламінарному й турбулентному руху рідини?

6. Дати визначення динамічної й кінематичної в'язкості.
7. Які фактори впливають на конвективний теплообмін?
8. Визначення коефіцієнта тепловіддачі.
9. Що таке середня температура рідини?
10. Як визначається середня температура рідини?
11. Як визначається середня швидкість рідини?
12. Як визначається еквівалентний діаметр для каналів некруглого перетину?
13. Як впливає природня конвекція на тепловіддачу при ламінарному руху рідини?
14. Які критеріальні рівняння рекомендують при ламінарному руху рідини?
15. Які критеріальні рівняння рекомендують при турбулентному руху рідини?
16. Чим відрізняється тепловіддача в змійовиках?
17. Які критеріальні рівняння слід застосовувати при руху рідини уздовж пластини?
18. Чим відрізняється процес тепловіддачі для одиночної труби при поперечному русі рідини?
19. Які критеріальні рівняння рекомендують для одиночної труби при поперечному руху рідини?
20. Які пучки труб застосовують у техніці?
21. Описати докладно характер омивання пучків труб при поперечному руху рідини.
22. Які критеріальні рівняння застосовують для пучків труб при поперечному руху рідини?
23. Як визначають середній коефіцієнт тепловіддачі для пучка труб?
24. При яких умовах виникають процеси кипіння й конденсації рідини?
25. Де утворюються пухирці пари?
26. Яке кипіння називають пухирцевим і плівковим?

27. Який момент кипіння називають критичним?
28. Які рівняння рекомендують для визначення коефіцієнта тепловіддачі при пухирцевому кипінні рідини?
29. Які розрізняють види конденсації?
30. Від чого залежить величина коефіцієнта тепловіддачі при конденсації?
31. Як визначається маса конденсату, що утворився?
32. Як впливає напрямок руху пари на тепловіддачу?
33. Як впливає на тепловіддачу стан поверхні?
34. Як впливають домішки газу на тепловіддачу при конденсації?
35. Який вплив на тепловіддачу має розташування поверхонь теплообміну в конденсаторі?
36. Природа променистої енергії.
37. Як різняться промені між собою?
38. Класифікація електромагнітних коливань.
39. На які частини ділиться променистий потік?
40. Що називається коефіцієнтом поглинання, відбиття й проникності?
41. Що називається абсолютно білою поверхнею, абсолютно чорною, абсолютно проникною, дифузійною й дзеркальною?
42. Який спектр випромінювання у твердих, рідких і газових тіл?
43. Що називається випромінювальною здатністю тіла?
44. Що називається інтенсивністю випромінювання?
45. Основний закон поглинання.
46. Закон Планка і його графічне зображення.
47. Закон Вина.
48. Закон Стефана — Больцмана.
49. Коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.
50. Сірі тіла. Що називається ступенем чорності?
51. Променистий теплообмін між паралельними пластинами.

52. Теплообмін випромінюванням, коли одне тіло перебуває усередині іншого.
53. Екрани.
54. Визначення сумарного теплового потоку випромінюванням і коефіцієнт тепловіддачі при випромінюванні.
55. Як визначається сумарний коефіцієнт тепловіддачі?
56. Променистий теплообмін у топках.
57. Що називається теплообмінним апаратом?
58. На які групи діляться теплообмінні апарати?
59. По яких схемах здійснюється рух рідин?
60. Основне рівняння теплопередачі й теплового балансу.
61. Графіки зміни температур робочих рідин в апаратах із прямотоком і протитечією.
62. Як проводиться усереднення коефіцієнта теплопередачі?
63. Як визначаються кінцеві температури робочих рідин в апаратах із прямотоком, протитечією й перехресним струмом?

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Лабораторна робота №1

Тема: Визначення середньої масової ізобарної теплоємності повітря.

Мета роботи: експериментальне визначення середньої масової теплоємності повітря при постійному тиску й зіставлення результатів зі значеннями, отриманими на підставі молекулярно-кінетичної теорії (МКТ).

Теоретичні положення

Теплоємність є теплофізичною характеристикою будь-якої речовини. При термодинамічних процесах важливо знати кількісне співвідношення між теплотою Q , переданої в процесі, і зміною температури t робочого тіла. Це співвідношення встановлюється теплоємністю.

Під теплоємністю розуміється така кількість теплоти, яку необхідно підвести або відвести від одиниці кількості речовини, щоб при цьому її температура змінилася на один градус.

Теплоємність тіла, що відповідає нескінченно малій зміні температури, називається істинною теплоємністю:

$$C = \frac{dq}{dt}; \quad (1.1)$$

а теплоємність тіла, що відповідає зміні температури на скінченну величину від t_1 до t_2 , називається середньою теплоємністю:

$$C \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{Q}{t_2 - t_1}; \quad (1.2)$$

Теплоємність розділяють на:

- масову $C, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

- об'ємну (при нормальних умовах $P = 101,3 \text{ кПа}$, $t = 0^\circ\text{C}$) $C_{об}, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$;

- мольну $C_\mu, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$.

Зв'язок між $C, C_{об}, C_\mu$ може бути встановлений залежністю:

$$C = C_{об} \cdot V = \frac{C_\mu}{\mu};$$

де V - питомий обсяг, $\text{м}^3/\text{кг}$;

μ - молекулярна маса газу, а. о. м.,

або

$$C_{об} = \frac{C_\mu}{22,4}; \quad (1.3)$$

де 22,4 - обсяг 1 кмоль газу при нормальних умовах, $\text{м}^3/\text{кмоль}$. Теплоємність є функцією процесу, що залежить від характеру його протікання й може змінюватися від $-\infty$ до $+\infty$. Зокрема, якщо процес передачі тепла здійснюється при постійному тиску ($P = \text{const}$), теплоємність називається ізобарною й позначається C_p , а при здійсненні процесу при постійному обсязі ($V = \text{const}$) теплоємність називається ізохорною й позначається C_v .

Зв'язок між C_p та C_v для газів може бути виражений, через рівняння Майєра:

$$C_p = C_v + R; \quad (1.4)$$

або через коефіцієнт Пуассона (показник адіабати):

$$k = \frac{C_p}{C_v}; \quad (1.5)$$

У випадку ізотермічного процесу $dt = 0; C = \infty$. Коли відсутня передача тепла $dq = 0; C = 0$.

Відповідно до молекулярно-кінетичної теорії газів, мольні теплоємності ідеального одноатомного газу обчислюються по формулах, які наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Мольні теплоємності ідеального газу

Атомність	Одноатомний	Двоатомний	Багатоатомний
$C_{V\mu}$	$\frac{3}{2} \cdot R_{ун}$	$\frac{5}{2} \cdot R_{ун}$	$\frac{6}{2} \cdot R_{ун}$
$C_{p\mu}$	$\frac{5}{2} \cdot R_{ун}$	$\frac{7}{2} \cdot R_{ун}$	$\frac{8}{2} \cdot R_{ун}$

$$R_{ун} = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} - \text{універсальна газова постійна.}$$

Таким чином, теплоємність ідеального газу не залежить від температури, у відмінності від теплоємності реального газу. Тому при практичних розрахунках використовують середню теплоємність, обумовлену для даного процесу в інтервалі температур від t_1 до t_2 (по формулі (1.2)). Очевидно, що чим менше різниця температур, тим більше наближення значення середньої теплоємності до істинної.

Значення теплоємності для різних речовин приводяться в спеціальних термодинамічних таблицях. Середня теплоємність може бути визначена по формулі (1.2), або по формулі:

$$C \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{C \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - C \Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}; \quad (1.6)$$

Де $C \Big|_0^{t_2}; C \Big|_0^{t_1}$ - середні теплоємності газу в діапазоні температур від 0 до t_2 і від 0 до t_1 відповідно. Одним із завдань лабораторної роботи є порівняння отриманого експериментальним шляхом значення теплоємності повітря C_p для різних інтервалів температур зі значеннями теплоємності, визначеними по термодинамічних таблицях для цих же температурних діапазонів, або по МКТ.

Опис експериментальної установки

Визначення теплоємності повітря провадиться методом проточного калориметрирування. Схема установки представлена на рис.1.1. Калориметр складається з металевого корпусу 1, всередині якого розміщений нагрівальний елемент 3. Зовні в зоні нагрівання корпус покритий тепловою ізоляцією 2 для зменшення теплових втрат. Нагрівальний елемент підключений через лабораторний автотрансформатор (ЛАТР) 11, за допомогою якого здійснюється регулювання теплової потужності калориметра, визначеною за показниками вольтметра 13 і амперметра 12. Включення ЛАТРу й нагрівача в мережу здійснюється вимикачем 9. Для індикації роботи нагрівача передбачена сигнальна лампа 10.

Постійна витрата повітря через калориметр створюється вентилятором 4 і визначається по показанню рідинного тягонапоромера (ТНЖ) 7, для якого датчиком є пневмотрубка 6.

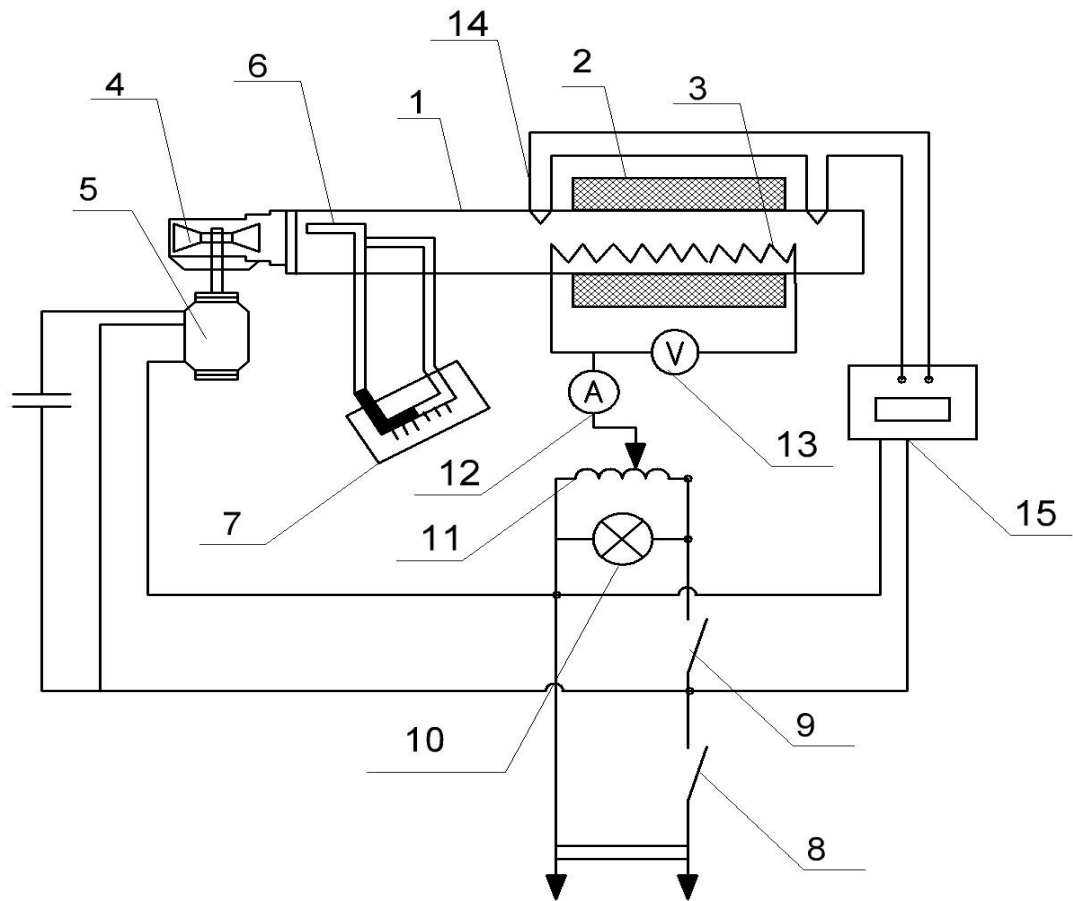
Вентилятор приводиться в дію електродвигуном 5, що підключається до мережі загальним вимикачем 8.

Для визначення різниці температур повітряного потоку на вході й на виході з калориметра встановлені термомпари 14, які підключені до вимірника температури.

Включення всієї лабораторної установки здійснюється загальним вимикачем 8.

Порядок проведення досліду

1. Перевірити, що всі вимикачі перебувають у виключеному стані, рукоятка ЛАТРа – знаходиться у крайньому виключеному положенні, рівень води в ТНЖ - на «нулі».
2. Замірити барометричний тиск і температуру повітря в приміщенні.



1 – металевий корпус; 2 – теплова ізоляція; 3 – електронагрівальний елемент; 4 – вентилятор; 5 – електродвигун; 6 – пневмотрубка-витратомір; 7 – рідинний тягонапоромер; 8 – загальний вимикач; 9 – вимикач нагрівача; 10 – сигнальна лампа роботи нагрівача; 11 – лабораторний автотрансформатор; 12 – амперметр; 13 – вольтметр; 14 – мідь-константанові термопари; 15 – вимірювач температури

Рисунок 1.1 – Схема експериментальної установки

3. Включити установку в мережу загальним вимикачем 8, при цьому почне працювати вентилятор.
4. Включити в мережу вимірник температури.
5. Включити ЛАТР вимикачем 9. При цьому загоряється сигнальна лампа 10.

6. Установити за допомогою рукоятки ЛАТРа навантаження нагрівального елемента, орієнтуючись на показання амперметра. Величина струму задається викладачем або приймається на початку 1,5 А, потім для трьох інших режимів - 2,0; 2,5; 3 А.

7. Через 5 хвилин після встановлення навантаження ЛАТРОм, провести 2 - 3 виміри величини температури. При цьому її величина не повинна відрізнятися від попереднього виміру більш ніж на 1°C . У цьому випадку режим можна вважати сталим.

8. При сталому режимі необхідно зробити виміри й запис показань інших приладів лабораторної установки: величину струму I , напруги U , динамічного тиску $P_{дин}$ (по ТНЖ).

9. Повторити дії, вказані в пп. 6 - 8 для трьох наступних режимів.

10. Закінчивши виміри, відключити універсальний вольтметр, за допомогою рукоятки ЛАТРа зменшити потужність нагрівача до «нуля» (нульове показання вольтметра й амперметра) і відключити нагрівач і ЛАТР вимикачем 9.

11. Через 2 - 3 хвилини відключити вентилятор вимикачем 8. Результати вимірів занести до протоколу (додаток 1.).

Обробка отриманих даних і оформлення звіту

1. Визначити теплову потужність нагрівального елемента:

$$Q = U \cdot I; \quad (1.7)$$

де U - напруга, В,

I - сила струму в ланцюзі нагрівача, А.

2. По трьом останнім значенням показань вимірника визначити середнє значення й визначити підвищення температури повітря в калориметрі: Δt .

3. З рівняння стану ідеального газу визначити щільність повітря на вході в калориметр:

$$\rho = \frac{P_{бар} \cdot \mu}{R_{ун} \cdot (t_6 + 273)}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (1.8)$$

де $P_{бар}$ - барометричний тиск повітря, Па, визначається по лабораторному барометру;

$\mu = 28,9 \text{ а.е.м.}$ - молекулярна маса повітря;

t_6 - температура навколишнього повітря, °С, визначається по лабораторному термометру.

$$R_{ун} = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$$

4. По показанню ТНЖ визначити середню швидкість повітря в калориметрі:

$$V = 3,94 \cdot \sqrt{\frac{P_{дин}}{\rho}}, \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (1.9)$$

де $P_{дин}$ - швидкісний напір, обмірюваний по ТНЖ, розподілів.

5. Визначити масова секундна витрату повітря через калориметр:

$$G = \rho \cdot V \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (1.10)$$

де $d = 0,05 \text{ м}$ - внутрішній діаметр калориметра.

6. З умови теплового балансу (рівності потужності нагрівача й кількості теплоти, сприйнятої в секунду повітрям, що його обтікає) визначається теплоємність повітря:

$$C \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{Q}{G \cdot \Delta t \cdot 1000}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}} \quad (1.11)$$

де $t_1 = t_6$ - температура повітря на вході в калориметр, °С;

$t_2 = t_1 + \Delta t$ - температура повітря на виході з калориметра, °С.

7. По визначеним для трьох режимів значенням середньої теплоємності побудувати графік залежності теплоємності від середньої температури повітря.

8. Обчислити по формулі (1.6) середню ізобарну теплоємність повітря C_p для кожного режиму за табличним даними (додаток 2).

9. Визначити експериментальну погрішність вимірів для кожного режиму:

$$\sigma = \left| \frac{C_p - C_{таб}}{C_{таб}} \right| \cdot 100\% \quad (1.12)$$

де C_p - значення теплоємності, отримане шляхом дослідження (по формулі (1.11)),

$C_{таб}$ - табличне значення теплоємності, визначене по формулі (1.6)

10. Розрахувати значення теплоємностей C , використовуючи вираження (1.3) і порівняти їх з величиною, отриманою по МКТ (табл. 1.1.).

Зробити висновок про величину розбіжності ізобарної теплоємності, визначеної експериментальним шляхом в досліді, обчисленої за табличним даними та визначеної по МКТ.

Звіт оформляється один на бригаду й повинен містити наступні відомості:

- основні положення теорії;
- короткий опис експериментальної установки та її схему;
- результати вимірів і розрахунків у вигляді протоколу (додаток 1);
- графічну залежність теплоємності C_p від температури.

Розрахунки додаються на окремому аркуші.

Контрольні питання

Для допуску до лабораторної роботи

1. Що є метою роботи?
2. Який метод використовується для визначення теплоємності?
3. За допомогою яких датчиків визначаються значення різниці температур Δt ?
4. Яким образом змінюється потужність нагрівального елемента?
5. За показниками яких приладів визначається величина потужності нагрівача?

6. За допомогою якого пристрою вимірюється витрата повітря?
7. У якій послідовності включаються елементи установки?
8. Коли робиться запис показань вимірника температур після включення калориметра?
9. Коли режим вважається сталим ?
10. За якими значеннями встановлюється навантаження нагрівача в кожному із чотирьох режимів?
11. Коли робляться записи показань амперметра, вольтметра й ТНЖ?
12. Після яких дій можна відключити нагрівач?
13. Коли можливе відключення вентилятора?

Для захисту роботи

1. Дайте визначення теплоємності.
2. Що розуміється під істинною й середньою теплоємкостями?
3. Як розрізняють теплоємність по кількості речовини, до якої підводиться теплота?
4. Як розрізняють теплоємність залежно від умов протікання процесу теплообміну?
5. Чому дорівнює теплоємність при адіабатному й ізотермічному процесах?
6. Як залежить теплоємність ідеального й реального газів від температури?
7. Якими залежностями зв'язані між собою C_p і C_v ?
8. Як зв'язані між собою теплоємності C , $C_{об}$, C_{μ} ?
9. Як визначити теплоємність у діапазоні температур від t_1 до t_2 за відомим значенням теплоємностей у діапазонах від 0 до t_1 і від 0 до t_2 ?

Лабораторна робота №2.

Тема: Визначення показника адіабати повітря.

Мета роботи: поглиблення знань у теорії дослідження термодинамічних процесів, ознайомлення з методикою дослідного визначення показника адіабати реальних газів, одержання навичок у проведенні теплотехнічного експерименту і його статистичної обробки.

При виконанні роботи провадиться експериментальне визначення чисельного значення показника адіабати повітря й ознайомлення зі статистичними методами обробки результатів експерименту.

Теоретичні положення

Для дослідження термодинамічних процесів, що характеризують зміну стану робочого тіла (газу або пару), використовується ряд основних положень технічної термодинаміки. Перший закон термодинаміки говорить, що все тепло, підведене до робочого тіла, затрачається на зміну його внутрішньої енергії й здійснення роботи розширення:

$$dQ = dU + dL \quad (2.1)$$

рівняння стану робочого тіла:

$$P \cdot V = M \cdot R \cdot T \quad (2.2)$$

зв'язує основні параметри робочого тіла:

P - тиск, Па;

V - об'єм, займаний робочим тілом, м³;

T - абсолютну температуру, °K ;

M - масу газу, кг;

R - газову постійну, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$.

Шляхом спільного рішення рівняння (2.1) і (2.2) отримана залежність, що описує всі реальні термодинамічні процеси:

$$P \cdot V^n = const \quad (2.3)$$

Таке рівняння називається рівнянням політропи або політропного процесу, а n - показник політропи.

Показник політропи може приймати різні значення (від +0 до $\pm\infty$) і його величина буде відповідати відомим термодинамічним процесам, характеристики яких наведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики основних термодинамічних процесів

Найменування процесу	Рівняння в P - V діаграмі	Показник політропи	Рівняння першого закону термодинаміки	Значення теплоємності, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$	Рівняння в T - S діаграмі
Політропний	$P \cdot V^n = const$	n	$dQ = dE + dL$	$C = C_n$	$\Delta S = C_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$
Ізохорний	$V = const$	$n = \pm\infty$	$dQ = dE$	$C = C_v$	$\Delta S = C_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$
Ізобарний	$P = const$	$n = 0$	$dQ = dE + dL$	$C = C_p$	$\Delta S = C_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$
Ізотермічний	$T = const$	$n = 1$	$dQ = dL$	$C = \infty$	$\Delta S = R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}; T = const$
Адіабатний (ізоентропний)	$P \cdot V^n = const$	$n = K$	$dQ = 0$	$C = 0$	$\Delta S = 0$

На рис.2.1. представлено зображення основних термодинамічних процесів у P - V і T - S діаграмах, описуваних відповідними рівняннями табл.2.1.

Тому що робота розширення в термодинамічному процесі визначається по залежності:

$$dL = P \cdot dV, \text{ Дж} \quad (2.4)$$

то величина зробленої робочим тілом роботи може бути визначена в P - V діаграмі як площа під кривою термодинамічного процесу 1-2, тобто :

$$L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV, \text{ Дж} \quad (2.5)$$

Для визначення кількості тепла, підведеного до робочого тіла, використовується параметр стану - ентропія S , $\frac{Дж}{кг \cdot K}$:

$$dS = \frac{dQ}{T}, \frac{Дж}{кг \cdot K} \quad (2.6)$$

Таким чином, застосовуючи T-S діаграму, можна визначити кількість тепла, переданого робочому тілу, як площу під кривою термодинамічного процесу 1-2:

$$Q_{1-2} = \int_{s_1}^{s_2} T \cdot dS, Дж \quad (2.7)$$

Одним з найбільш часто зустрічаємих на практиці термодинамічних процесів є адіабатний процес.

Адіабатним процесом називається термодинамічний процес зміни стану робочого тіла, що відбуває без обміну теплом з навколишнім середовищем ($dQ = 0$).

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

Рівняння адіабатного процесу має вигляд:

$$P \cdot V^k = const, \quad (2.8)$$

де показник адіабати k , дорівнює відношенню ізобарної теплоємності C_p до ізохорної C_v :

$$k = \frac{C_p}{C_v} \geq 1 \quad (2.9)$$

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

для одноатомного газу

$$k = \frac{C_{\mu p}}{C_{\mu v}} = \frac{\frac{5}{2} \cdot R_{ун}}{\frac{3}{2} \cdot R_{ун}} = 1,66 \quad (2.10)$$

Для двоатомного газу

$$k = \frac{C_{\mu p}}{C_{\mu V}} = \frac{\frac{7}{2} \cdot R_{yn}}{\frac{5}{2} \cdot R_{yn}} = 1,44 \quad (2.11)$$

Для багатоатомного газу

$$k = \frac{C_{\mu p}}{C_{\mu V}} = \frac{\frac{8}{2} \cdot R_{yn}}{\frac{6}{2} \cdot R_{yn}} = 1,33 \quad (2.12)$$

Звідси видно, що *для ідеальних газів величина k є постійною*, що не залежить від параметрів стану газу.

Зв'язок між ізобарною й ізохорною теплоємкостями встановлює рівняння Майєра:

$$C_p - C_v = R \quad (2.13)$$

Виразивши з (2.13) C_p , формулу можна привести до виду:

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_v + R}{C_v} = 1 + \frac{R}{C_v} \quad (2.14)$$

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

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

Допустимо, що умови досліду з достатнім ступенем точності задовольняють рівнянню стану ідеального газу

$$P \cdot V = M \cdot R \cdot T \quad (2.15)$$

Представимо судину, заповнену газом, що має параметри: тиск P_1 і температуру T_1 перевищуючі параметри навколишнього середовища.

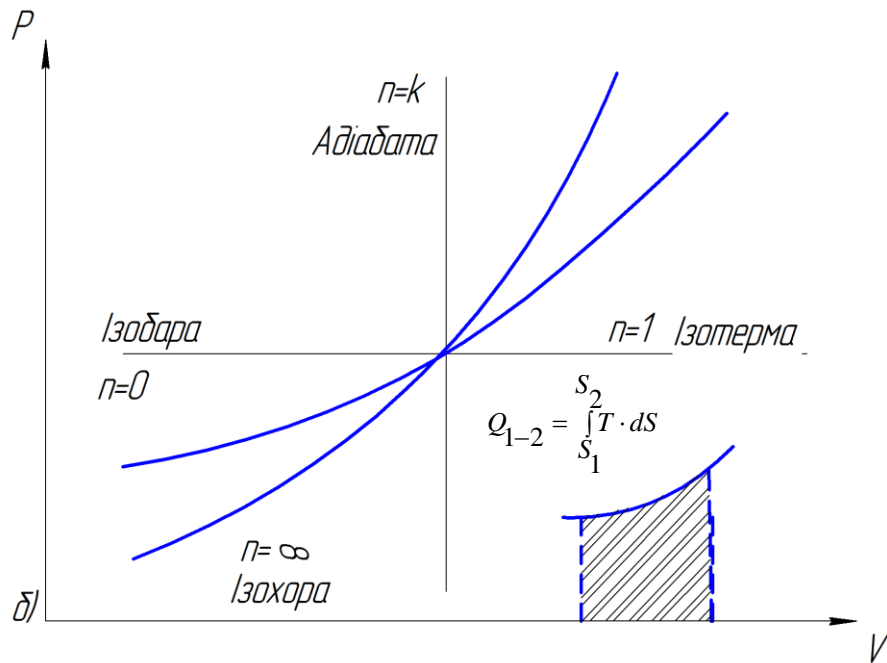
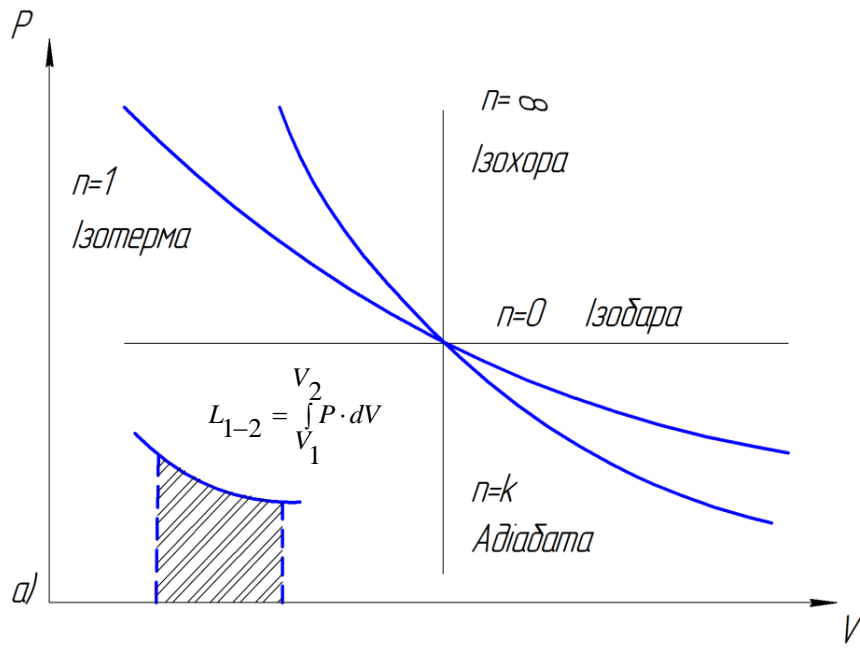


Рисунок 2.1 – Зображення термодинамічних процесів в $P-V(a)$ та $T-S(b)$ діаграмах

Таблиця 2.2 Основні характеристики адіабатного процесу

№	Характеристика	Рівняння
1	Зв'язок між тиском та температурою	$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1^{\frac{k}{k-1}}}{T_2^{\frac{k}{k-1}}}$
2	Зв'язок між тиском та об'ємом	$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_1^k}{V_2^k}$
3	Зв'язок між об'ємом та температурою	$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1^{\frac{k-1}{k}}}{T_2^{\frac{k-1}{k}}}$
4	Робота розширення	$L_{1-2} = \frac{R}{k-1} \cdot (T_2 - T_1)$
5	Технічна робота	$L_{1-2}^* = k \cdot L_{1-2}$
6	Теплоємність	$C_{1-2} = 0$

За рахунок охолодження стінок судини навколишнім середовищем і відводу якоїсь кількості теплоти q_1 , температура газу стане рівній температурі навколишнього середовища - T_2 , а тиск знизиться до якогось значення P_2 (процес 1-2 рис.2.2). Потім швидко випустимо газ із резервуара, дотримуючи тим самим умови адіабатного розширення - відсутність теплообміну з навколишнім середовищем. Наприкінці цього процесу (2-3) тиск у судині стане рівним тиску навколишнього середовища P_3 , а температура понизиться до T_3 , меншої T_2 . Закриємо судину й виждемо якийсь час, у плинні якого від навколишнього середовища до більше холодного тіла буде підведена теплота q_2 (процес 3-4). У результаті температура зросте до температури навколишнього середовища ($T_4=T_2$), а тиск підвищиться до якогось значення P_4 .

Розглянемо умовний ізотермічний процес 2-4. Оскільки для ізотермічного процесу рівняння (2.15) має вигляд

$$P \cdot V = const \quad (2.16)$$

То

$$\frac{V_2}{V_4} = \frac{P_4}{P_2} \quad (2.17)$$

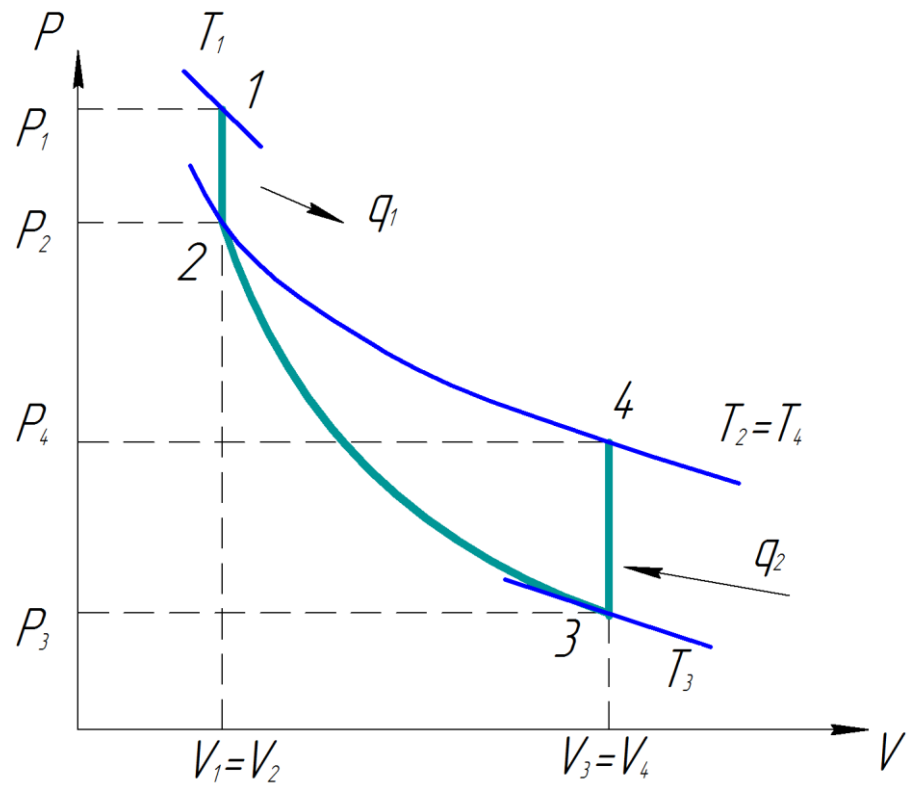


Рисунок 2.2 – До визначення показника адиабати газу

А так як $V_3 = V_4$, тоді

$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{P_4}{P_2} \quad (2.18)$$

Використовуючи рівняння адиабатного процесу:

$$P \cdot V^k = const \quad (2.20)$$

Можна записати

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{V_2^k}{V_3^k} \quad (2.21)$$

Так як $P_2 \cdot V_2^k = P_3 \cdot V_3^k$

Остаточно, прологарифмував вираження, одержимо

$$k = \frac{\ln \frac{P_3}{P_2}}{\ln \frac{V_2}{V_3}} = \frac{\ln \frac{P_3}{P_2}}{\ln \frac{P_4}{P_2}} \quad (2.22)$$

Ця формула буде надалі використовуватися при обробці результатів.

Опис експериментальної установки

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

Для індикації напруги кожної фази передбачений вольтметр 4 і сигнальна лампа 3. Установка обладнана розеткою 220В змінного струму 2. Триходовий кран у роботі займає два положення. В одному з них відбувається нагнітання повітря в ресивер, у другому - стиснене повітря з компресора йде в атмосферу, при цьому ресивер відключається від нагнітальної лінії (рис.2.4).

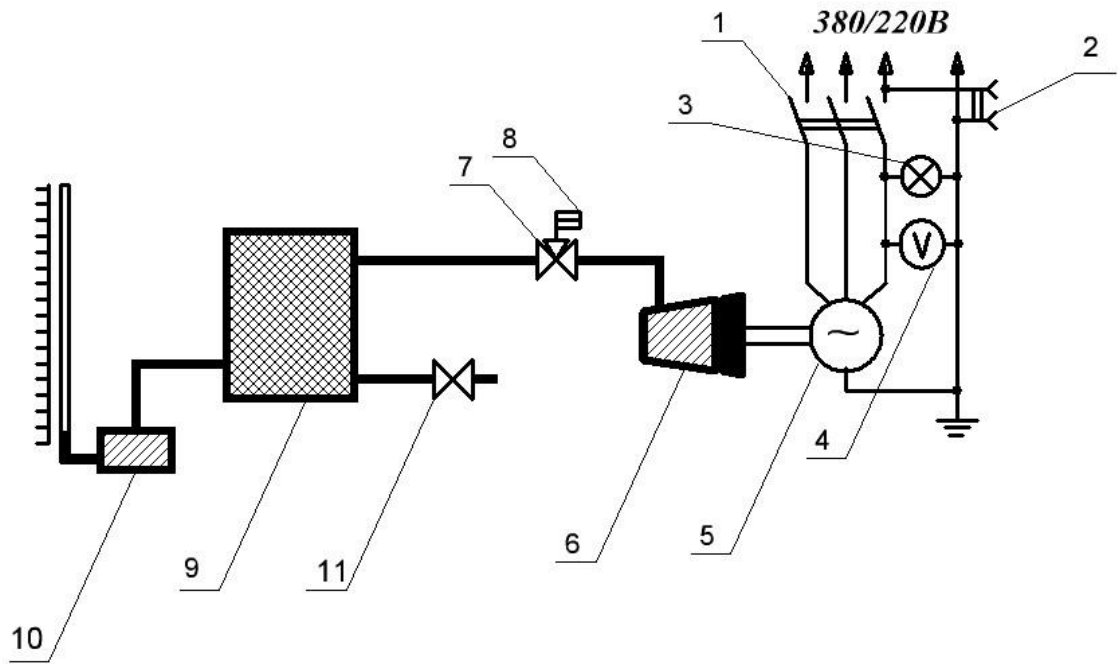
Порядок проведення досліду

1. Почерговим включенням кожного з вимикачів по показанню вольтметра перевірити напругу кожної фази. Дослід забороняється проводити, якщо відсутня напруга хоча б однієї фази.

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

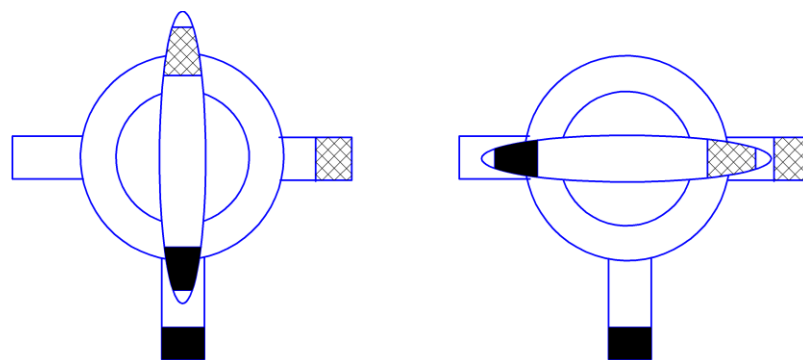
3. Перекрити кран 11. Кран 7 поставити в положення, при якому стиснене повітря з компресора буде надходити в ресивер.

4. Включити одночасно трьома вимикачами електродвигун і, спостерігаючи за показанням бакового манометра, закачати повітря в ресивер до тиску, необхідного в досліді ($P_{надл.1}$).



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

Рисунок 2.3 – Схема експериментальної установки



*Кран у положенні
 "компресор-атмосфера"*

*Кран у положенні
 "компресор-ресивер"*

Рисунок 2.4 – Положення триходового крану

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

6. Вивдавши 5-7 хвилин, необхідних для охолодження стисненого повітря до температури навколишнього середовища (про настання цього моменту буде свідчити стає показання манометра), записати значення тиску $P_{надл.2}$ до протоколу.

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

8. Після 5-7 хвилин, поки прогріється повітря, що остудилося при адіабатному розширенні, до температури навколишнього середовища, занести до протоколу значення тиску $P_{надл.4}$.

9. Кожна серія дослідів виконується 4 рази для різних початкових тисків (згідно п.п. 2-8), які або задаються викладачем, або приймаються рівними 800, 700 і 600 мм вод.ст. (близько 8, 7 і 6 кПа відповідно). Загальна кількість дослідів дорівнює 12.

Обробка отриманих даних і оформлення звіту

1. Визначити абсолютний тиск повітря на початку ізохорного процесу зниження тиску з відводом теплоти (P_1), на початку адіабатного розширення (P_2), на початку й наприкінці ізохорного підвищення тиску з підведенням теплоти (P_3 і P_4) по наступній формулі:

$$P_i = P_{надл.i} \cdot g + P_{бар}, Па \quad (2.23)$$

де $P_{бар}$ - барометричний тиск, Па, за показаннями лабораторного барометру;

$g = 9,81$ - прискорення вільного падіння, м/с² ;

$P_{надл}$ - надлишковий тиск, мм вод. ст.

2. Обчислити значення показника адіабати k по (2.22). Причому, приймаючи $P_3 = P_{\text{бар}}$, і використовуючи вираження (2.23), значення k можна визначити по наступній формулі:

$$k = \frac{\ln \frac{P_{\text{бар}}}{P_2}}{\ln \frac{P_4}{P_2}} \quad (2.24)$$

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

$$k = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_i \quad (2.25)$$

де n - кількість дослідів

4. Визначення відхилення кожного досліду

$$\Delta k_i = |k_i - \bar{k}| \quad (2.26)$$

5. Розрахувати дійсну помилку експерименту

$$\sigma_\delta = \pm \left| \frac{k_0 - \bar{k}}{k_0} \right| \cdot 100, \% \quad (2.27)$$

де $k_0 = 1,4$ - відоме загальноприйняте значення показника адіабати повітря.

6. Розрахувати середньоквадратичну помилку експерименту при $m=10$:

$$\sigma_k = \frac{1}{m} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \Delta k^2}{m-1}} \quad (2.28)$$

Звіт оформляється один на бригаду й повинен містити наступні відомості:

- основні положення теорії;
- короткий опис експериментальної установки й її схему;
- результати вимірів і розрахунків у вигляді протоколу (додаток 1). Розрахунки додаються на окремому аркуші.

Контрольні питання

Для допуску до роботи:

1. Що є метою лабораторної роботи?
2. Поясніть пристрій лабораторного стенда й призначення кожного елемента установки.
3. Що необхідно перевірити перед початком роботи?
4. Поясніть порядок включення й вимикання електродвигуна компресора.
5. Коли і які положення повинен займати триходовий кран?
6. Для чого необхідно робити витримку часу?
7. Які вимоги до швидкості відкриття випускного крана?
8. Вимір яких параметрів необхідно здійснити для визначення показника адіабати у досліді?
9. Як можна визначити, що температура стисненого повітря стала рівній температурі навколишнього середовища?
10. Які процеси мають місце в досліді?

Для захисту роботи:

1. Чому дорівнює показник адіабати?
2. Які чисельні значення k для газів різної атомності?
3. Від яких параметрів стану ідеального й реального газів залежить k ?
4. Як впливає температура на значення k ідеального й реального газів?
5. Тиск у яких точках необхідно знати, щоб визначити k ?
6. Якими залежностями зв'язані між собою k, C_p, C_v .
7. Яким газом - реальним або ідеальним вважається повітря в розрахункових співвідношеннях?
8. Охарактеризуйте процеси, що протікають у досліді?

Лабораторна робота № 3

Тема: Вивчення роботи поршневого компресора.

Мета роботи: дослідження характеристик одноступінчастого поршневого компресора, аналіз термодинамічних процесів, що відбуваються при стиску робочої речовини (повітря).

Теоретичні положення

Компресор - це теплотехнічний пристрій, призначений для підвищення тиску, стиску й переміщення газів або пару.

Компресори можна класифікувати в такий спосіб:

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

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

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

На рис. 3.1 представлена теоретична діаграма роботи найпростішого одноступінчастого поршневого компресора.

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

Зворотно-поступальний рух поршня в сполученні з роботою клапанної групи забезпечує протікання наступних робочих процесів (рис. 3.1):

- а) процес усмоктування 4-1 при повністю відкритому впускному клапані;
- б) процес стиску 1-2 при закритих клапанах;
- в) процес нагнітання 2-3 при відкритому нагнітальному клапані;
- г) умовний процес розширення 3-4, що замикає робочий цикл компресора.

Робота, затрачувана в компресорі на одержання 1 кг стислої робочої речовини, складається із суми всіх робіт перерахованих процесів:

$$L_k = L_{1-2} + L_{2-3} - L_{4-1}, \text{ Дж} \quad (3.1)$$

де $L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} P dV$ - робота зміни обсягу, визначається площею під лінією

1- 2;

$L_{2-3} = P_2 \cdot V_2$ - робота нагнітання, визначається площею під лінією 2-3;

$L_{4-1} = P_1 \cdot V_1$ - робота усмоктування, визначається площею під лінією 4-1 (віднімається зі зроблених витрат, тому що відбувається зовнішнім середовищем).

Площа робочого циклу компресора замикається по точках 1-2-3, у цьому випадку:

$$L_k = \int_{V_2}^{V_1} V dP \quad (3.2)$$

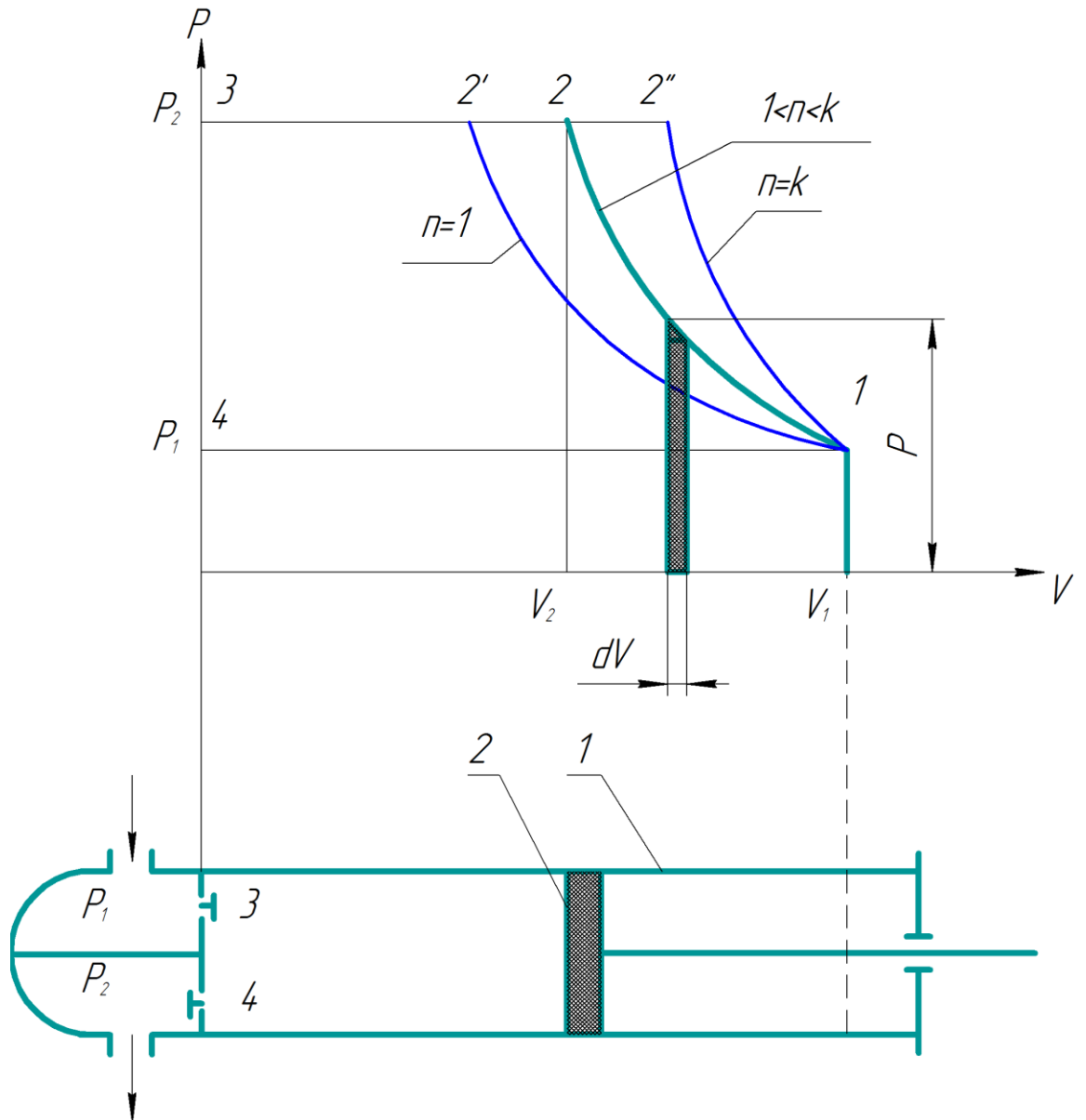
Аналіз теоретичної діаграми P - V компресора (рис. 3.1) показує, що як процеси стиску можна використовувати політропний процес, описуваний вираженням:

$$P \cdot V^n = const \quad (3.3)$$

при цьому показник політропи повинен мати значення $k \geq n \geq 1$.

Величина роботи компресора визначається процесом стиску. Теоретичний процес стиску залежно від теплообміну між робочим тілом і стінками циліндра може відбуватися по ізотермі 1- 2' ($n=1$), при цьому:

$$L_k = R \cdot T \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (3.4)$$



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

Рисунок 3.1 – Теоретична діаграма роботи поршневого одноступінчастого компресора

або по адіабаті 1- 2'' (n=k):

$$L_k = \frac{k \cdot R}{k-1} \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.5)$$

Ізотермічний процес стиску 1-2' характеризується мінімально затрачуваною роботою, що перетворюється в тепло й відводиться від робочого тіла що стискається. Такий процес прийнято вважати ідеальним. Реально ж на практиці його неможливо здійснити.

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

Зменшити роботу, затрачувану на привід компресора можливо, якщо використовувати систему примусового охолодження циліндра компресора. У цьому випадку буде відбуватися політропний процес стиску 1-2 (рис. 3.1.).

Реальні процеси стиску відрізняються від теоретичних у результаті дії наступних факторів:

1. Наявності мертвого простору, що становить обсяг середовища V_c , що не піддається витисненню поршнем і, що розширюється при зворотному русі поршня (лінія 3-4, рис. 3.2).
 2. Наявності втрат тиску ΔP у нагнітальному й впускному трактах, пульсацій тиску (лінії 3-4, рис. 3.2).
 3. Перетікання робочої речовини через різні конструктивні зазори й ущільнення.
 4. Витрати частини енергії на подолання тертя в механічних парах машини.
- Вплив більшої частини перерахованих факторів ураховується при побудові дійсної індикаторної діаграми роботи компресора (рис. 3.2).

До основних технічних характеристик компресора відносяться наступні показники.

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

$$M_k = \rho \cdot V_u \cdot \lambda_k \cdot n, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (3.6)$$

де ρ - густина стисливої речовини, $\text{кг}/\text{м}^3$;

V_u - обсяг циліндра компресора, м^3 ;

$\lambda_k = \frac{V_3}{V_4}$ - коефіцієнт подачі, що враховує зменшення дійсної продуктивності компресора в порівнянні з теоретичною. Теоретична потужність, затрачувана на привід компресора:

$$N_k = M_k \cdot L_k, \text{Вт} \quad (3.7)$$

Ступінь підвищення тиску стисливого середовища:

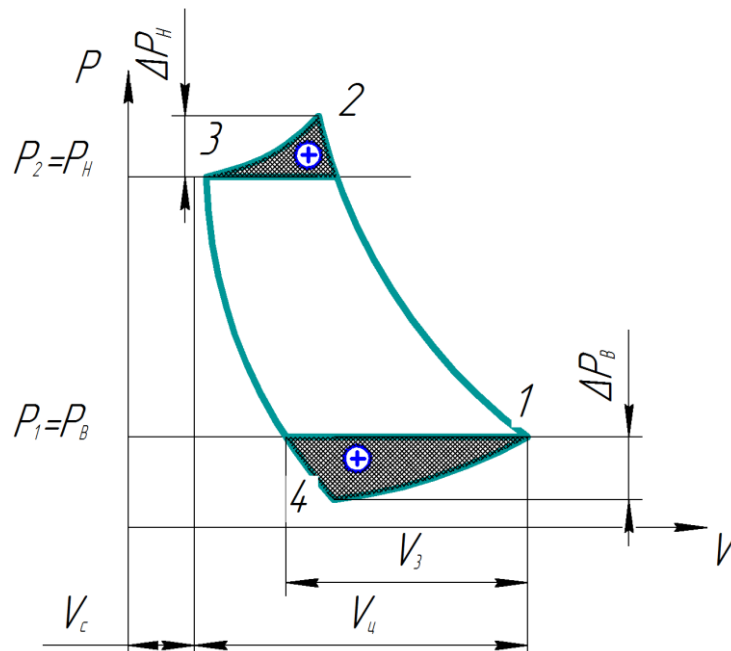
$$\beta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.8)$$

Для оцінки енергетичної досконалості компресора використовується ефективний КПД:

$$n_e = \frac{N_{ad}}{N_c} \quad (3.9)$$

де N_{ad} - теоретична потужність компресора при адіабатному стиску;

N_c - дійсна потужність приводу компресора.

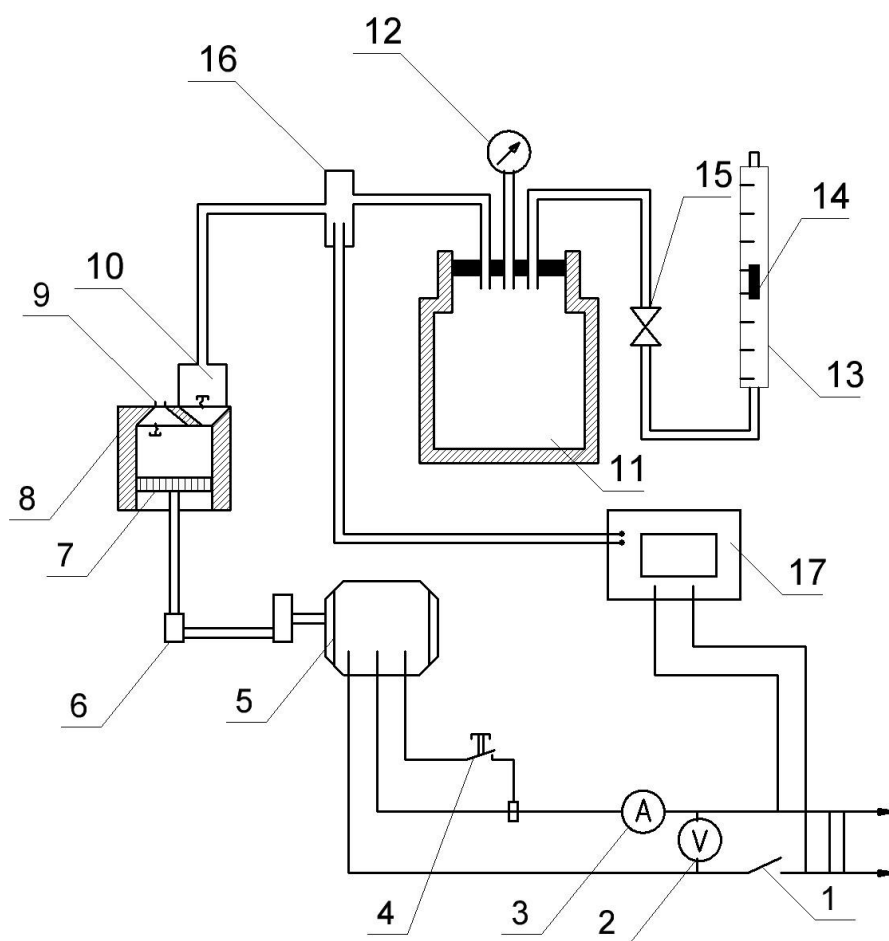


P_e - тиск усмоктування; P_n - тиск нагнітання; $\Delta P_e, \Delta P_n$ - втрати тиску в клапанах; V_e - корисний об'єм; V_u - об'єм циліндра; V_c - шкідливий об'єм

Рисунок 3.2 – Дійсна індикаторна діаграма роботи компресора

Опис експериментальної установки

Для проведення дослідів використовується вертикальний одноциліндровий поршневий компресор. Схема експериментальної установки представлена на (рис. 3.3.). Стиск повітря відбувається в циліндрі 8 при зворотно-поступальному русі поршня 7, що забезпечується механічною передачею, що включає кривошипно-шатунний механізм 6, зв'язаний приводом з електродвигуном 5.



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

Рисунок 3.3 – Схема лабораторної установки

Усмоктування й нагнітання повітря робиться через впускний і нагнітальний клапани відповідно 9 і 10, розташовані на кришці циліндра.

Стисле у компресорі повітря, подається в резервуар 11. Тиск повітря контролюється манометром 12, а його температура визначається по величині термоЕРС термопари 16, вимірником температури 17. Продуктивність компресора визначається по показанню ротаметра 13 - градуйованої трубки, у середині якої перебуває поплавець 14. Стиснене повітря з резервуара випускається через регулюючий вентиль 15 і ротаметр 13. Для визначення потужності, споживаної електродвигуном 5, що приводить у дію компресор, у ланцюг живлення включений амперметр 3 і вольтметр 2. Мережний вимикач 1 і пускова кнопка 4 призначені для запуску компресора в роботу. Включення вимірника в мережу виробляється через окреме джерело живлення.

Порядок проведення досліду

Перед початком досліду необхідно зняти показання по лабораторних приладах: температуру навколишнього середовища, атмосферний тиск повітря.

1. Відкрити повністю вентиль 15 на 1-2 хвилини для випуску можливо залишився в резервуарі стисненого повітря, закрити вентиль.
2. Запустити компресор у роботу, включивши мережний вимикач 1 і нажавши пускову кнопку 4.
3. Забезпечити підвищення надлишкового тиску повітря в резервуарі до 60 - 80 кПа (0,6 - 0,8 кгс/см²).
4. Поступовим відкриттям вентиля 15 установити витрату стисненого повітря, орієнтуючись на положення поплавця в межах 20- 30 ділень шкали ротаметра.
5. Включити вимірник температури.
6. Після закінчення 20-25 хвилин роботи компресора визначити температуру стисненого повітря, використовуючи значення вимірника температури.

ри 17, виміряти споживаний електродвигуном струм, напругу в мережі й надлишковий тиск у резервуарі.

7. Після проведення досліду відключити електродвигун вимикачем 1 і відкрити вентиль 15 для випуску стисненого повітря в атмосферу.

8. З інтервалом 10-15 хвилин провести два досліди в послідовності по п.п. 2-7 при більшій продуктивності компресора, обумовленою витратою повітря в діапазоні 50-60 і 70-80 розподілів шкали ротаметра.

Обробка отриманих даних і оформлення звіту

1. Потужність, споживана електродвигуном компресора:

$$N_e = U \cdot I, \text{Вт} \quad (3.10)$$

2. Тиск на виході з компресора визначається по формулі:

$$P_2 = 9,81 \cdot 10^4 \cdot \frac{P_m}{P_{max}} + P_1, \text{Па} \quad (3.11)$$

де P_m - показання манометра, кг/см²,

P_{max} - максимум шкали манометра, у діленнях.

P_1 - барометричний тиск, Па, вимірюване по лабораторному барометрі.

3. Ступінь підвищення тиску:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.12)$$

4. Визначається підвищення температури повітря при стиску:

$$\Delta t = 8E, ^\circ\text{C} \quad (3.13)$$

де E - ЕРС термопари, мВ.

5. Теоретична робота компресора при адіабатному стиску 1 кг повітря:

$$L_k = c_p \cdot \Delta t, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \quad (3.14)$$

де $c_p = 1004$ - ізобарна теплоємність повітря, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

6. Продуктивність компресора визначається по формулі:

$$M_k = 2,4 \cdot 10^5 \cdot H_p, \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (3.15)$$

де H_p - величина підйому поплавця ротаметра, ділень.

7. Теоретичну потужність адіабатного компресора можна визначити як

$$N_k = L_k \cdot M_k, \text{Вт} \quad (3.16)$$

8. Ефективний ККД компресора:

$$\eta_c = \frac{N_k}{N_e \cdot \eta_m \cdot \eta_e} \cdot 100, \% \quad (3.17)$$

де $\eta_m = 0,82$ - механічний ККД компресора,

$\eta_e = 0,84$ - ККД електродвигуна компресора.

9. Через ступінь підвищення тиску β визначити теоретичну роботу компресора:

$$L''_k = \frac{k \cdot R \cdot (t_1 + 273)}{k - 1} \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} - 1, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \quad (3.18)$$

де t_1 - температура повітря на вході в компресор, °С (для повітря показник адіабати $k = 1,4$, газова постійна $R = 286 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$).

10. Експериментальна помилка визначення роботи, затрачуваної на привід компресора, розраховується по залежності:

$$\sigma = \frac{L_k - L''_k}{L''_k} \cdot 100, \% \quad (3.19)$$

Звіт оформляється один на бригаду й повинен містити наступні відомості:

- основні положення теорії;
- короткий опис експериментальної установки й її схему;
- результати вимірів і розрахунків у вигляді протоколу (додаток 1). Розрахунки додаються на окремому аркуші.

Контрольні питання

Для допуску до роботи:

1. Що є метою лабораторної роботи ?
2. Назвіть основні призначення компресорів і їхні модифікації.
3. Які допущення застосовуються при аналізі роботи ідеалізованого компресора?
4. У якому процесі стиску затрачається мінімальна робота компресора?
5. Чому адіабатний процес стиску найбільш просто здійснити на практиці?
6. Які параметри характеризують ефективність роботи компресора?
7. Поясніть призначення основних елементів експериментальної установки.
8. Поясніть послідовність проведення досліду.
9. Приведіть приклади практичного застосування компресорів.

Для захисту роботи:

1. Запишіть вираження, що визначають роботу компресора в політропному процесі стиску.
2. Запишіть вираження, що визначають роботу компресора в ізотермічному процесі стиску.
3. Покажіть хід основних процесів стиску в теоретичній діаграмі компресора.
4. Поясніть цикл компресора в дійсній $P-V$ діаграмі.
5. До чого приведе наявність великого мертвого обсягу в компресорі з високим ступенем стиску?

Лабораторна робота № 4

Тема: Тепловіддача експериментальної горизонтальної труби при вільному русі повітря.

Мета роботи: поглиблення знань по теорії конвективного теплообміну при вільному русі середовища, ознайомлення з методикою дослідження процесу тепловіддачі, одержання навичок у проведенні експерименту.

У процесі роботи необхідно ознайомитися з теоретичними основами методики експериментального дослідження процесу тепловіддачі, визначити значення коефіцієнта тепловіддачі при вільному русі повітря біля горизонтально розташованої нагрітої труби, провести аналіз рівняння подоби, застосованого для опису процесу вільної конвекції, використовуючи дані експерименту.

Теоретичні положення

Конвективним теплообміном, або тепловіддачею, називається процес переносу теплової енергії між поверхнею твердого тіла й середовищем (рідиною або газом). При цьому процес переносу теплової енергії нерозривно пов'язаний з переміщенням середовища, взаємодіючої із твердим тілом.

По природі виникнення розрізняють вільний і змушений рух середовища. Вільним рухом теплоносія називають рух, що відбувається внаслідок різниці щільності нагрітих і холодних елементарних обсягів рідини або газу в гравітаційному полі (у цьому випадку діє, так звана, піднімальна сила). Змушеним називають рух середовища, що виникає під дією сторонніх сил (насоса, вентилятора й т.д.).

Інтенсивність тепловіддачі при вільному русі залежить від різниці температур між тілом і середовищем, фізичних властивостей середовища й геотермічних факторів (форми, розмірів, положення тіла в просторі), а також ряду інших факторів.

Кількість переданого тепла (тепловий потік Q) при конвективному теплообміні визначається за законом Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t \text{ або } q = \alpha \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

де $q = \frac{Q}{F}$ - щільність теплового потоку, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

Δt - температурний напір (різниця температур тіла, t_m , і навколишнього середовища, t_c), $К$

$$\Delta t = t_m - t_c, К$$

α - коефіцієнт тепловіддачі, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$.

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

В експериментах середнє значення коефіцієнта тепловіддачі при вільному русі може бути визначене з рівняння (4.1):

$$\alpha = \frac{q}{t_m - t_c}, \quad (4.2)$$

де t_m - температура поверхні тіла, $^{\circ}С$;

t_c - температура середовища (у цьому випадку повітря), $^{\circ}С$.

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

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

$$N_u = f(G_r \cdot P_r) \quad (4.3)$$

На підставі узагальнення великого експериментального матеріалу М.А.Михєєвим отримане наступне чисельне рівняння подоби:

$$N_u = C \cdot (G_r \cdot P_r)^n \quad (4.4)$$

де N_u - число Нуссельта, що характеризує інтенсивність конвективного теплообміну

$$N_u = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (4.5)$$

G_r - число Грасгофа, що характеризує ефективність піднімальної сили, що викликає рух середовища

$$G_r = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2} \quad (4.6)$$

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

$$P_r = \frac{\nu}{a} \quad (4.7)$$

У вираженні чисел подоби входять параметри: β - коефіцієнт об'ємного розширення, $\frac{1}{K}$:

$$\beta = \frac{1}{t_{жс} + 273} \quad (4.8)$$

ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\frac{m^2}{c}$

a - коефіцієнт температуропровідності, $\frac{m^2}{c}$

λ - коефіцієнт теплопровідності, $\frac{Вт}{м \cdot К}$;

L - характерний розмір дослідженої труби, м;

Δt - різниця між середньою температурою поверхні розрахункової ділянки й температурою навколишнього середовища, K ;

α - коефіцієнт тепловіддачі, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

g - прискорення вільного падіння, $\frac{М}{с^2}$;

C и n - чисельні коефіцієнти рівняння подоби.

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

Таблиця 4.1 може бути використана для порівняння отриманих у досліді результатів з відомими даними й визначення режиму руху повітря.

Таблиця 4.1 – Горизонтальні труби

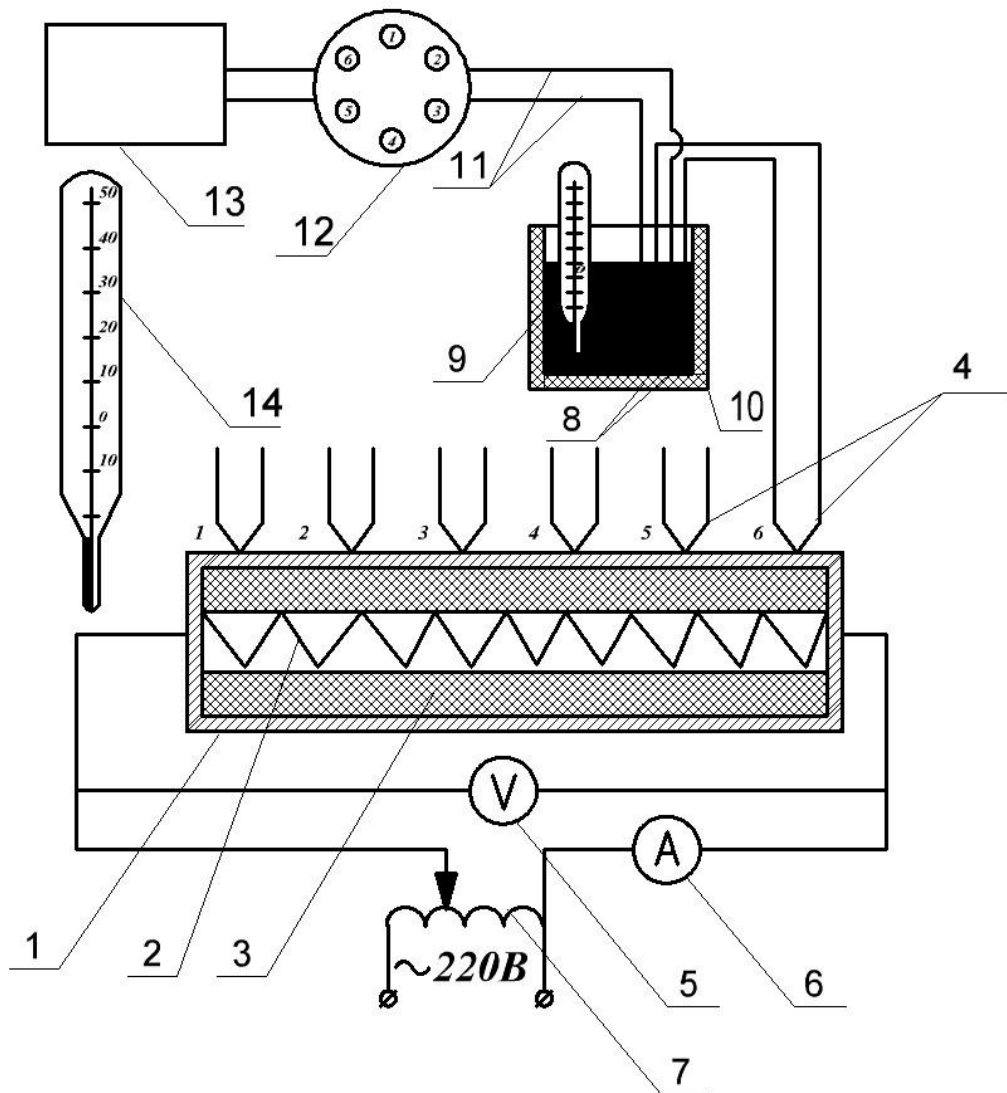
Режим руху повітря	$G_r \cdot P_r$	C	n
Ламінарний	$5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^8$	0,5	0,25
Турбулентний	$5 \cdot 10^8 - 5 \cdot 10^9$	0,15	0,33

Рівняння (4.4) справедливо для подібних явищ теплообміну лише в інтервалі експериментально отриманих значень добутку $G_r \cdot P_r$. Значення коефіцієнта пропорційності C и показника ступеня n визначаються на підставі обробки експериментальних даних і побічно характеризують режим обтікання рідиною нагрітого при вільній конвекції. Користуючись рівнянням (4.4) при конкретних числових значеннях C и n , знаючи основні параметри стінки й навколишнього середовища, можна визначити коефіцієнт тепловіддачі від стінки до рідини або навпаки - від рідини до стінки.

Опис експериментальної установки

Сутність експериментального методу, використовуваного в лабораторній роботі, полягає у визначенні кількості тепла, що віддається дослідженою трубою в навколишнє середовище, і знаходженні температур труби й середовища на сталому тепловому режимі. Схема експериментальної установки наведена на (рис. 4.1).

Об'єктом дослідження є експериментальна мідна труба 1, усередині якої розташований нагрівальний елемент 2. Торці дослідженої труби захищені тепловою ізоляцією, а простір між трубою й нагрівачем заповнено піском. Схеми експериментальної установки



1 – горизонтальна труба; 2 – нагрівальний елемент; 3 – заповнювач - пісок; 4 – гарячі спаї термопар (№ 1-6); 5 – вольтметр; 6 – амперметр; 7 – ЛАТР; 8 – холодні спаї термопар; 9 – термометр для виміру температури холодних спаїв; 10 – судина Дьюара; 11 – компенсаційні дроти; 12 – перемикач термопар; 13 – вимірник температури; 14 – термометр для виміру температури навколишнього середовища

Рисунок 4.1 – Схема експериментальної установки

Зовнішній діаметр труби $d_H = 46\text{мм}$, довжина труби $L = 940\text{мм}$. Нагрівальний елемент живиться через лабораторний автотрансформатор (ЛАТР) 7 від мережі змінного струму напругою 220 В. Визначення потужності, споживаної нагрівальним елементом, відбувається за показниками амперметра 6 і вольтметра 5. Кількість виділюваного й переданого в навколишнє середовище тепла визначається по споживаній електричній потужності.

Для виміру температури поверхні що віддає тепло, в стінці труби закладені шість рівновіддалених друг від друга термопар 4. Номера термопар на схемі відповідають номерам крапок на перемикачі 12. На схемі спаї термопар умовно показані уздовж однієї утворюючої труби. У дійсності, для обліку зміни температури по поверхні труби, термопари розташовані відносно один одного під кутом 60° .

В експериментальній установці використані хромель-копелеві термопари, гарячі спаї яких закарбовані на поверхні труби. ЕРС термопар вимірюється вимірником температури 13. Всі холодні спаї термопар поміщені в судину 10, де перебуває масло при постійній температурі t_{xc} . При цьому температура поверхні труби визначається по формулі:

$$t_c = t_{mv} - t_{xc} \quad (4.9)$$

де t_c - температура стінки труби в даній крапці, $^\circ\text{C}$;

t_{mv} - показання потенціометра, переведені в $^\circ\text{C}$;

t_{xc} - температура холодного спаю термопари, $^\circ\text{C}$.

Це обумовлене тим, що за допомогою термопар вимірюється тільки різниця температур між холодним і гарячим спаєм і якщо $t_{xc} \neq 0$ $^\circ\text{C}$, то температура в точці виміру визначається як сума t_{mv} і t_{xc} . Температура навколишнього повітря t_{xc} вимірюється вдалині від дослідженої труби ртутним термометром 14.

Опис методики проведення експерименту

Після ознайомлення з описом експериментальної установки необхідно заготовити форму протоколу (Додаток 1) для запису спостережень і розпочати виконання роботи.

Всі виміри на стенді робляться при строго сталому тепловому режимі. Настання сталого теплового режиму визначається по незмінній температурі поверхні труби й характеризується тим, що тепловий потік, виділюваний з поверхні дослідженої труби, залишається постійним. Час настання сталого теплового режиму становить приблизно 30- 40 хвилин.

За вказівкою викладача або лаборанта після включення установки в мережу, ЛАТРоМ піднімається напруга до режиму роботи установки ($U = 80 \div 120V$), що рекомендується.

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

Дані вимірів кожного проведеного дослідження заносяться до протоколу (Додаток 1), у тому числі напруга U , сила струму I , показання вимірювача температури, котрий підключається послідовно до шести термопар, а також температуру повітря t_c і час початку проведення дослідження.

Обробка експериментальних даних

Для кожного сталого теплового режиму необхідно:

1. Обчислити кількість тепла, виділену на розрахунковій ділянці дослідженою трубою:

$$Q = W = I \cdot U, \text{Вт} \quad (4.10)$$

де I - струм, А;

U - величина напруги, В.

Виділене тепло віддається навколишньому середовищу конвективним теплообміном і випромінюванням:

$$Q = Q_k + Q_n, \text{Вт} \quad (4.11)$$

де Q_k - тепло, передане повітрю тільки шляхом конвективного теплообміну, Вт;

Q_n - тепло, передане навколишньому середовищу шляхом випромінювання, Вт.

2. Обчислити середню температуру поверхні труби

де t_{Ti} - показання термопар по мілівольтметрі з урахуванням температури холодних шарів.

$$t_T = \frac{\sum_{i=1}^6 t_{Ti}}{6}, ^\circ\text{C} \quad (4.12)$$

3. Обчислити променисту складову виділеного тепла

$$Q_n = C_{np} \cdot \left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \cdot F \quad (4.13)$$

де $T_T = t_c + 273, \text{K}$ - середня температура стінки труби; приймається як середня арифметична з показань шести термопар при сталому режимі;

$T_c = t_c + 273, \text{K}$ - температура навколишнього повітря;

$C_{np} = 2,09 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ - наведений коефіцієнт випромінювання,

$F = \pi \cdot d \cdot L, \text{м}^2$ - поверхня дослідженої труби,

4. Обчислити кількість тепла, передана повітрю шляхом конвективного теплообміну

$$Q_k = Q - Q_n, \text{Вт} \quad (4.14)$$

5. Обчислюємо щільність теплового потоку

$$q_k = \frac{Q_k}{F}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (4.15)$$

6. Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha = \frac{Q_k}{\pi \cdot d_H \cdot L \cdot \Delta t}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad (4.16)$$

Залежність (4.16) строго справедлива лише для даної дослідженої труби. Для поширення отриманих результатів на інші подібні процеси необхідно досліджені дані зрівняти зі значеннями, одержуваними з узагальненого рівняння подоби (4.4).

7. Обчислити числа подоби:

$$\text{Нуссельта} \quad N_a = \frac{\alpha \cdot d_n}{\lambda} \quad (4.17)$$

$$\text{Грасгофа} \quad G_r = g \cdot \beta \cdot d_n^3 \cdot \frac{t_T - t_C}{\nu^2} \quad (4.18)$$

$$\text{Прандтля} \quad P_r = \frac{\nu}{a} \quad (4.19)$$

Фізичні параметри повітря (ν, a, λ) беруться з таблиці (Додаток 2) при середній температурі повітря.

$$t_{cp} = 0,5 \cdot (t_T + t_C) \quad (4.20)$$

Коефіцієнт β розраховується по залежності:

$$\beta = \frac{1}{t_{cp} + 273,15}, \frac{1}{\text{°К}} \quad (4.21)$$

8. Відповідно до отриманого значення добутку G_r, P_r вибрати значення показників (C^* і n^*), що входять у рівняння подоби по таблиці 4.1 і розрахувати величину критерію Нуссельта по формулі:

$$N_u^* = C^* \cdot (G_r \cdot P_r)^{n^*} \quad (4.22)$$

9. Визначити погрішність формули Михеева для умов досліджу:

$$\sigma = \left| \frac{N_u^* - N_u}{N_u} \right| \cdot 100\% \quad (4.23)$$

10. Визначити приладову погрішність розрахунку коефіцієнта тепловіддачі:

$$\gamma_{\alpha} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta J}{J} + \frac{2 \cdot \Delta t_T}{t_T} \right) \cdot 100\% \quad (4.24)$$

де максимальне відхилення контрольного параметра визначається по класі точності K_i приладу. Наприклад для вольтметра:

$$\Delta U_i = 0,01 \cdot U_{\max} \cdot k_u \quad (4.25)$$

де U_{\max} - максимальне значення шкали вольтметра;

k_u - клас точності вольтметра по шкалі приладу;

Δt_T - помилка ртутного термометра (звичайно 0,5 °С).

Контрольні питання

Для допуску до виконання роботи:

1. Що експериментально визначається в роботі?
2. Що називається сталим режимом?
3. Що необхідно знати для поширення отриманих даних на інші явища конвективного теплообміну?
4. Якій фізичній картині відповідає сталий режим?
5. Що є кінцевою метою роботи?
6. Як задаються режими експериментального дослідження?
7. Як робиться запис параметрів, що заміряються?
8. Для чого замер температур поверхні труби зроблений у шести точках?
9. Чим визначається кількість вимірів на одному режимі?

Для захисту звіту:

1. Фізична сутність передачі тепла конвекцією, випромінюванням і теплопровідністю.
2. Що називається конвективним теплообміном?
3. Чому в чистому виді конвекція відсутня?

4. У яких середовищах і чому може спостерігатися конвективний теплообмін?
5. Що називається тепловіддачею?
6. Запишіть закон Ньютона-Рихмана?
7. Що характеризує і який фізичний зміст коефіцієнта тепловіддачі?
8. Від яких факторів залежить коефіцієнт тепловіддачі?
9. Який конвективний теплообмін називається вільним?
10. Який конвективний теплообмін називається змушеним ?
11. Який фізичний зміст чисел Нуссельта, Грасгофа й Прандтля?
12. У чому розходження між обумовленими й визначальними числами подоби?
13. Що називається рівнянням подоби?
14. У якому діапазоні параметрів справедливо отримане рівняння подоби?
15. Як користуватися рівнянням подоби?
16. Назвіть область застосування отриманого вами рівняння подоби?
17. Як перевірити, чи можна отриманим рівнянням користуватися при інших геометричних параметрах труби й іншій температурі?

Лабораторна робота №5

Тема: Визначення коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів методом труби.

Мета роботи: поглиблення знань в області теорії теплопровідності, вивчення методики експериментального визначення коефіцієнта теплопровідності ізоляційних матеріалів, дослідження ефективності теплової ізоляції й одержання навичок у проведенні експериментальних робіт.

У процесі підготовки й при проведенні лабораторної роботи, студенто-ві необхідно:

- ознайомиться з теоретичними положеннями, що є основою методу труби;
- ознайомиться зі складом устаткування й принципом дії експериментальної установки;
- визначити значення коефіцієнта теплопровідності досліджуваного матеріалу;
- визначити ефективність застосування ізоляційних матеріалів для зниження теплових втрат при ізоляції труб.

Теоретичні положення

Явище теплопровідності являє собою процес поширення теплової енергії при безпосереднім зіткненні окремих тіл або усередині даного тіла при наявності різниці температур. Теплопровідність обумовлена рухом атомів і молекул речовини. Основним законом теплопровідності є закон Фур'є.

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

Відповідно до закону Фур'є інтенсивність переносу тепла у твердому тілі, оцінюється величиною теплового потоку Q , визначається температурним градієнтом $\text{grad}(t)$ і значенням коефіцієнта теплопровідності даної речо-

вини $\lambda \left(\frac{Вт}{м \cdot К} \right)$. Градієнт температури $grad(t)$ залежить від параметрів температурного поля в розглянутому тілі.

Коефіцієнт теплопровідності λ є теплофізичним параметром речовини, він характеризує здатність матеріалу проводити теплову енергію. Для різних матеріалів коефіцієнт теплопровідності залежить від структури, щільності, теплоємності, температури, тиску маючи певні значення в даних умовах. Звичайно для нижчеперелічених розрахунків коефіцієнт теплопровідності визначається по таблицях, у яких приводяться теплофізичні властивості речовини.

Значення коефіцієнта теплопровідності визначається дослідним шляхом на спеціальних лабораторних установках. Одним із застосовуваних у теплотехніці методів визначення λ є метод труби або циліндра.

Для визначення теплопровідності матеріалу циліндричної стінки при постійному значенні коефіцієнта λ (у випадку сталого теплового стану системи, коли температура у всіх точках тіла не міняється), можна використовувати рівняння Фур'є наведене до виду:

$$q_1 = \frac{\pi \cdot \Delta t}{\frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \left| \frac{d_2}{d_1} \right|}, \frac{Вт}{м} \quad (5.2)$$

де $\Delta t = t_1 - t_2$ - різниця температур між внутрішньою й зовнішньою поверхнею труби $^{\circ}К$;

$q_1 = \frac{Q}{L}$ - щільність теплового потоку по довжині труби L , $Вт/м$.

У випадку багат шарової стінки, що складає із шарів різних матеріалів, рівняння теплопровідності має вигляд:

$$q_1 = \frac{\pi \cdot (t_1 - t_2)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}, \frac{Вт}{м} \quad (5.3)$$

Усяке покриття гарячої поверхні, що сприяє зниженню втрат теплової енергії в навколишнє середовище, називається тепловою ізоляцією. Для теп-

лової ізоляції можуть бути використані будь-які матеріали з низьким коефіцієнтом теплопровідності (гази, пористі матеріали, азбест, пробка, скловата, ошурки й інші). Часто на практиці ізолюються трубопроводи, по яких рухаються гарячі середовища. На рис.5.1, зображена найбільш проста схема одношарової ізоляції трубопроводу.

У загальному випадку рівняння, що описує передачу тепла через відрізок ізольованого трубопроводу довжиною L , буде мати вигляд:

$$Q = \frac{\pi \cdot L \cdot (t_{ж1} - t_{ж2})}{R_{із}} \quad (5.4)$$

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

Без ізоляції:
$$R = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} \quad (5.5)$$

З ізоляцією:
$$R = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{із}} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_3} \quad (5.6)$$

У вирази (5.5.) і (5.6) входять коефіцієнти теплопровідності матеріалу труби й ізоляції $\lambda, \lambda_{із}$, а також коефіцієнти тепловіддачі α_1 і α_2 , що характеризують процеси передачі тепла до стінки труби від гарячого теплоносія з температурою $t_{ж1}$ і від ізоляції з боку навколишнього середовища $t_{ж2}$.

Для зниження теплових втрат потрібно, щоб термічний опір ізольованого трубопроводу був вище, ніж в оголеної труби:

$$\Delta R = R_{із} - R \geq 0$$

Вирішуючи цю нерівність із обліком формул 5.5 і 5.6 щодо величини $\lambda_{із}$, одержимо умову ефективності застосування ізоляції:

$$\lambda_{із}^* \leq 0,5 \cdot \alpha_2 \cdot d_2 \quad (5.7)$$

Якщо умова (5.7) не здійсненна, то треба вибрати інший матеріал, для якого $\lambda_{із} \leq \lambda_{із}^*$, інакше при його нанесенні на трубопровід теплові втрати будуть зростати.

Найбільші теплові втрати при неправильному виборі матеріалу ізоляції відповідають критичному діаметру ізоляції, обчисленому по

$$d_{kp} = 2 \cdot \frac{\lambda_{i3}}{\alpha_2} \quad (5.8)$$

Якщо розраховане значення критичного діаметра менше діаметра труби, що ізолюється, то ізоляція буде ефективною.

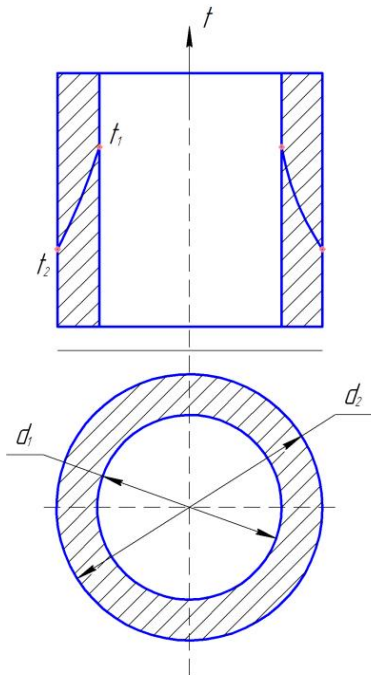
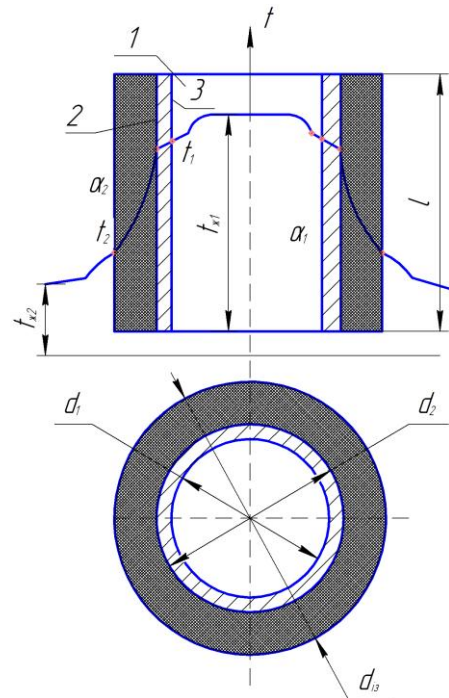
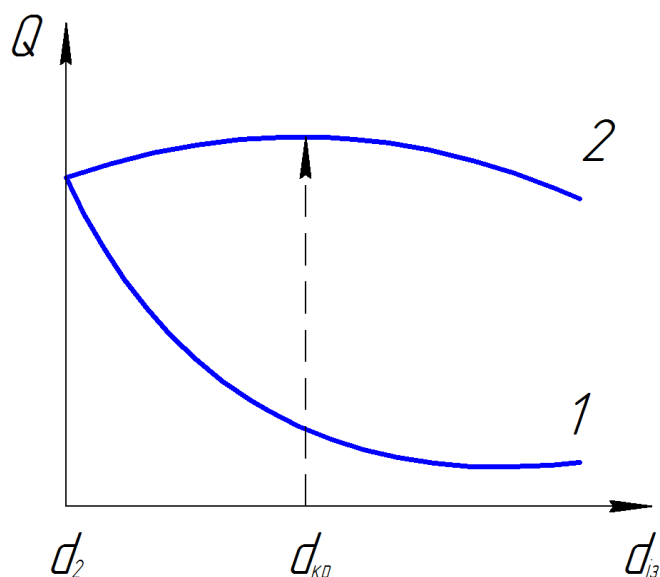


Рисунок 5.1 - Однорідна циліндрична стінка



1 – гаряча середа;
2 – стінка трубопроводу;
3 – теплова ізоляція

Рисунок 5.2 - Схема одношарової теплової ізоляції



1 – правильний вибір матеріалу; 2 – неправильний вибір матеріалу.

Рисунок 5.3 – Залежність теплових втрат з поверхні трубопроводу від діаметра ізоляції

Опис експериментальної установки

Схема установки представлена на рис.5.4. Експериментальна установка складається з металеві труби - 1, покритої шаром досліджуваного ізоляційного матеріалу - 2, яким є азбест.

Нагрівання труби здійснюється нагрівальним елементом - 3, при цьому для регулювання напруги застосовується лабораторний трансформатор (ЛАТР) - 7. Для визначення потужності, споживаної нагрівальним елементом, у ланцюг живлення включений вольтметр - 8.

Кількість виділюваного в навколишнє середовище тепла через поверхню труби визначається по витраті електричної енергії. Для зниження теплових втрат торці труби закриті тепловою ізоляцією.

Температура матеріалу що випробується, вимірюється десятьма хромель-капельними термопарами. П'ять термопар 4 заміряють температуру на

внутрішній поверхні ізоляції, а інші п'ять термопар 5 - на зовнішній поверхні.

Вторинним приладом для виміру температури є мілівольтметр - 9. Для послідовного підключення термопар до вимірника температур служить перемикач - 10. Для визначення температури ізоляції використовується той же вимірник.

Вимір температури навколишнього повітря проводиться за допомогою ртутного лабораторного термометра - 11.

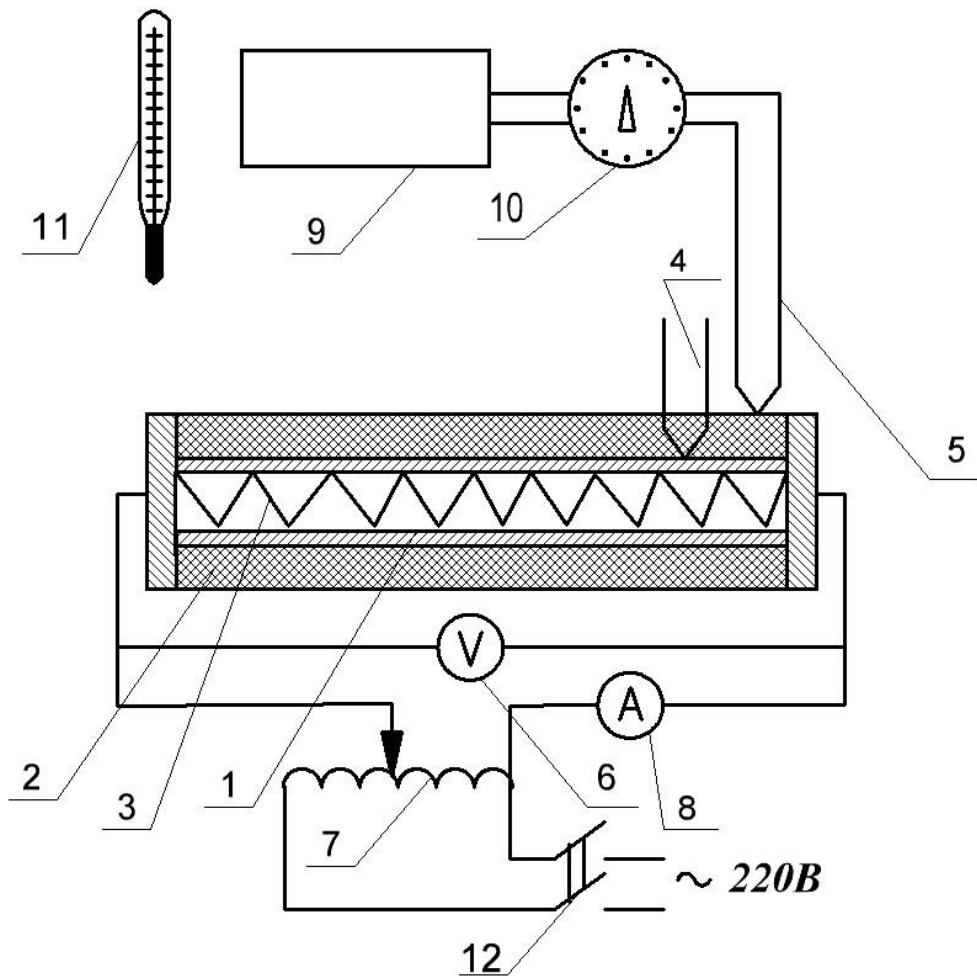
Методика проведення експерименту

Включення установки в мережу вимикачем - 12 (рис.5.4) здійснюється під спостереженням викладача або лаборанта. За рекомендацією викладача встановлюється тепловий режим (задається значення напруги, що регулюється за допомогою ЛАТРА - 7).

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

Показання термопар визначають, послідовно підключаючи їх до мілівольтметра - 9 перемикачем - 10, повторюючи виміри 2 ÷ 3 рази через 5 ÷ 10 хвилин. При цьому режим можна вважати сталим, якщо вимірювані температури поверхні ізоляції двох послідовних дослідів відрізняються не більш, ніж на 5°C .

Параметри, що знімаються на установці, заносять до протоколу (Додаток 1).



1 – металева труба; 2 – шар ізоляції; 3 – нагрівальний елемент; 4 – термопари на внутрішній поверхні ізоляції; 5 – термопари на зовнішній поверхні ізоляції; 6 – вольтметр; 7 – автотрансформатор (ЛАТР); 8 – амперметр; 9 – вимірник температури; 10 – перемикач термопар; 11 – ртутний термометр; 12 – вимикач мережі

Рисунок 5.4 – Схема експериментальної установки

Обробка експериментальних даних

1. Обчислюється тепловий потік, виділюваний нагрівальним елементом:

$$Q = U \cdot J, \text{Вт} \quad (5.9)$$

2. Обчислюється середня температура внутрішньої поверхні ізоляційного шару:

$$\bar{t}_1 = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}, ^\circ C \quad (5.10)$$

3. Визначається середня температура зовнішньої поверхні ізоляційного шару:

$$\bar{t}_2 = \frac{t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}}{5}, ^\circ C \quad (5.11)$$

4. Обчислюється коефіцієнт теплопровідності для ізоляційного матеріалу:

$$\lambda_{iz} = \frac{Q \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (\bar{t}_1 - \bar{t}_2)}, \frac{Вт}{м \cdot К} \quad (5.12)$$

де $d_2 = 0,04 м$, $d_3 = 0,05 м$ - геометричні розміри ізоляції;

$L = 0,9 м$ - довжина труби.

5. Визначається коефіцієнт тепловіддачі від ізоляції в навколишнє середовище:

$$\lambda_{iz} = \frac{Q}{\pi \cdot d_3 \cdot L \cdot (t_2 - t_0)}, \frac{Вт}{м \cdot К} \quad (5.13)$$

де t_0 - температура повітря за показниками лабораторного термометра.

6. Установлюється ефективність ізоляції зі співвідношення:

$$\lambda_{iz}^* \leq 0,5 \cdot \alpha_2 \cdot d_2 \quad (5.14)$$

7. Визначається критичний діаметр ізоляції:

$$d_{kp} = 2 \cdot \frac{\lambda_{iz}}{\alpha_2} \quad (5.15)$$

8. Погрішність визначення коефіцієнта теплопровідності.

Теоретична (приладова):

$$\gamma = \left(\frac{\Delta U_n}{U} + \frac{\Delta J_n}{J} + \frac{2 \cdot \Delta t_n}{t_1 + t_2} \right) \cdot 100\% \quad (5.16)$$

де максимальне відхилення контрольного параметра визначається по класі точності K_i приладу. Наприклад для вольтметра:

$$\Delta U_1 = U_{\max} \cdot \frac{k_u}{100} \quad (5.17)$$

У цьому випадку U_{\max} - максимальне значення шкали вольтметра, k_u - клас точності вольтметра по шкалі приладу. Помилка ртутного термометра Δt_n звичайно становить $0,5^\circ\text{C}$.

Експериментальна:

$$\sigma = \frac{\lambda_{iz} - \lambda_0}{\lambda_0} \cdot 100\% \quad (5.18)$$

де $\lambda_0 = 0,201 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ - довідкове значення коефіцієнта.

Оформлення звіту

Звіт повинен бути оформлений індивідуально кожним студентом і містити наступні відомості:

- основні положення теорії;
- схему експериментальної установки;
- протокол експериментальних і розрахункових даних у вигляді таблиці (Додаток 1).

Контрольні питання

Для допуску до виконання роботи:

1. Який процес являє собою явище теплопровідності?
2. Чим оцінюється інтенсивність переносу тепла у твердому тілі?
3. Яка величина є теплофізичним параметром речовини?
4. Що називається тепловою ізоляцією?
5. Яка умова повинна виконуватися для зниження теплових втрат?

Для захисту звіту:

1. Як здійснюється передача теплової енергії у твердих тілах?
2. Чим визначається інтенсивність переносу теплової енергії у твердих тілах?
3. Поясніть чинність основного закону теплопровідності.
4. Дайте визначення коефіцієнта теплопровідності.
5. Від чого залежить величина коефіцієнта теплопровідності?
6. Що таке теплова ізоляція?
7. У яких випадках звичайно застосовують теплову ізоляцію?
8. Приведіть приклад теплового ізолятора.
9. Що такий термічний опір?
10. Визначите умову ефективності застосування ізоляції на трубопроводі.
11. Поясніть зміну теплових втрат на рис.5.3.
12. Що таке критичний діаметр ізоляції?
13. Чому, як правило, трубопроводи малих діаметрів не ізолюють?
14. Поясніть призначення основних елементів експериментальної установки (рис.5.4).
15. Які пристрої застосовуються для виміру температури в даній лабораторній роботі?
16. Як визначити клас точності приладу експериментальної установки?

ІНДИВІДУАЛЬНА КОНТРОЛЬНА РОБОТА

Задача 1. Атмосферне сухе повітря складається з 21% кисню O_2 та 79% азоту N_2 (інші гази в повітрі не враховуються). Визначити масовий склад повітря, його питому газову постійну, щільність, середню молярну масу та парціальний тиск кисню та азоту.

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

Таблиця 1 – Вихідні дані

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

Задача 2. Суміш, що складається з M_1 кіломолей азоту й M_2 кіломолей кисню з початковими параметрами $P_1 = 1 \text{ МПа}$, $T_1 = 1000 \text{ К}$ розширюється до тиску P_2 . Розширення може здійснюватися по ізотермі, адіабаті й політропі з показником n . Визначити газову постійну суміші, її масу й початковий обсяг, кінцеві параметри суміші, роботу розширення й теплоту, що бере участь у процесі.

Дати зведену таблицю результатів та аналіз її. Показати процеси в pv – та Ts – діаграмах. Вихідні дані, що необхідні для рішення, знаходяться в таблиці 2.

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

Таблиця 2 – Вихідні дані

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

Задача 3. Яку кількість теплоти необхідно підвести до повітря в замкненому сосуді об'ємом V_1 . Визначити також масу повітря та кінцевий тиск.

Вихідні дані для розв'язку задачі наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Вихідні дані

Остання цифра залікової книжки	t_1 , °C	t_2 , °C	Передостання цифра залікової книжки	P_1 , кПа	V_1 , м ³
0	100	500	0	300	0,50
1	125	550	1	250	0,75
2	150	600	2	275	1,00
3	175	575	3	375	1,25
4	200	625	4	425	1,50
5	250	525	5	200	1,75
6	300	700	6	400	2,00
7	325	675	7	225	2,25
8	375	750	8	470	2,50
9	400	775	9	325	2,75

Задача 4. Кисень у кількості 5 кг при початковому тиску P_1 та початковій температурі t_1 розширюється по політропі до кінцевого тиску P_2 та кінцевої температури t_2 . Визначити показник політропи, початковий та кінце-

вий об'єми, роботу розширення, кількість підведеної теплоти, зміну внутрішньої енергії та зміну ентропії.

Вихідні дані для розв'язку задачі зведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Вихідні дані

Остання цифра залікової книжки	$P_1, \text{кПа}$	$P_2, \text{кПа}$	Передостання цифра залікової книжки	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
0	2000	100	0	427	27
1	2100	150	1	358	52
2	2400	200	2	652	33
3	2900	250	3	433	58
4	3200	300	4	487	24
5	3500	350	5	324	87
6	4000	400	6	641	41
7	4300	450	7	549	45
8	4600	500	8	318	49
9	5100	550	9	645	18

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

Задача 6. Визначити масу та ентальпію вологого повітря зі ступенем вологості x_0 та тиском P .

Вихідні дані для розв'язання задачі наведені в таблиці 6.

Таблиця 5 – Вихідні дані

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

Таблиця 6 – Вихідні дані

Остання цифра залікової книжки	$V, \text{м}^3$	$P, \text{МПа}$	Передостання цифра залікової книжки	$x_0, \%$
0	0,5	1,0	0	10
1	0,75	1,5	1	15
2	1,0	2,25	2	20
3	1,25	2,75	3	25
4	1,5	3,0	4	30
5	1,75	3,5	5	35
6	2,0	4,25	6	40
7	2,25	4,5	7	45
8	2,5	4,75	8	50
9	2,75	5,0	9	55

Задача №7. Визначити годинну витрату пару D (кілограмів в годину) та питому витрату пару d (кілограмів на кіловат-годину) на конденсаційну парову турбіну, що працює без регенерації теплоти, по заданій електричній потужності турбогенератора $N_{ел}$, тиску P_1 та температурі t_1 перегрітого пару перед турбіною та відносному внутрішньому ККД турбіни η_{oi} . Тиск в парі конденсатора прийняти $P_2 = 4 \text{кПа}$. Механічний ККД турбіни η_m та ККД елект-

рогенератора η_e прийняти $\eta_m = \eta_e = 0,99$. Визначити також ступінь сухості пара в кінці теоретичного і дійсного процесів розширення (зобразивши процеси hs – діаграми) та абсолютний ККД турбогенератора. Потужністю приводу живлячого насосу зневажити. Вихідні дані, необхідні для вирішення завдання, обрати з таблиці 7.

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

Таблиця 7 – Вихідні дані

Остання цифра залікової книжки	$N_{ei}, MВт$	η_{oi}	Передостання цифра залікової книжки	$P_1, МПа$	$t_1, ^\circ C$
0	100	0,76	0	8,5	500
1	120	0,77	1	9,5	510
2	140	0,79	2	9,2	515
3	160	0,81	3	12	540
4	180	0,83	4	12	520
5	200	0,85	5	13	540
6	170	0,84	6	13	520
7	130	0,82	7	14	540
8	150	0,8	8	8,6	480
9	190	0,86	9	9	500

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Термодинамика / Н.М. Беляев. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 344с.
2. Нащекин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. Учеб. пособие для вузов М., «Высшая школа», 1969. – 560 с.: ил.
3. Кушнырев В.И. Техническая термодинамика и теплопередача Учеб. Для вузов / В.И. Кушнырев, В.И. Лебедев, В.А. Павленко. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.: ил.
4. Техническая термодинамика: Учеб. для машиностроит. спец. вузов / В.И. Крутов, С.И. Исаев, И.А. Кожин и др.; Под ред. В.И. Крутова. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Высш. Шк., 1991.- 384 с.: ил.

ДОДАТКОВА ЛІТЕРАТУРА

1. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача, Изд. 3-е. – М.: Высшая школа, 1980. – 469с.
2. Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача: Учеб. для авиац. вузов. – 3-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1991. – 480 с.: ил.
3. Исаченко В.П. и др. Теплопередача, Изд. 4-е. – М.: Энергоиздат, 1981.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1977.
5. Баскаков А.П. и др. Теплотехника. – М.: Энергоиздат, 1982.
6. Кирилин В.А. и др. Техническая термодинамика, Изд. 3-е. – М.: Наука, 1979.

ДОДАТОК 1

Протокол експериментальних та розрахункових даних
до лабораторної роботи №1

№з/п	Параметри	Позначення	Величина, N режиму		
1	Сила струму, А	I			
2	Напруга, В	U			
3	Теплова потужність, Вт	Q			
4	Барометричний тиск, Па	$P_{бар}$			
5	Температура повітря на вході в калориметр, °С	t_1			
6	Середнє значення ЕРС, мВ	\bar{E}			
7	Середнє значення різності температур, °С	Δt			
8	Температура повітря на виході в калориметр, °С	t_2			
9	Масова витрата повітря, кг/с	G			
10	Теплоємність, що отримана експериментально, $\frac{кДж}{кг \cdot ^\circ C}$	C_p			
11	Теплоємність за табличними даними, $\frac{кДж}{кг \cdot ^\circ C}$	$C_p _{t_1}^{t_2} = C_{таб.}$			
12	Теплоємність по МКТ, $\frac{кДж}{кг \cdot ^\circ C}$	$C_p = \frac{7}{2} \cdot R$			
13	Експериментальна похибка, %	σ			

Протокол експериментальних та розрахункових даних
до лабораторної роботи №2

№ дос- ліду	Надмірний тиск у реверсі							Показник адіабати k_i	Відхилення Δk_s
	По показникам маноме- тру, мм.вод.ст.				Абсолютний, Па				
	$P_{ізб1}$	$P_{ізб2}$...	$P_{ізб5}$	P_2	P_4	$P_{бар}$		
1									
2									
...									
12									
Середнє значення показника адіабати								\bar{k}	
Дійсна помилка експерименту								σ_l	
Середньоквадратична помилка експерименту								σ_k	

Протокол експериментальних та розрахункових даних
до лабораторної роботи №3

№ з/п	Параметри	Позна- чення	Розмір- ність	Величина		
				1 дос- лід	2 дос- лід	3 дос- лід
1	Температура навколишнього повітря	t_1	°C			
2	Барометричний тиск повітря	P_1	Па			
3	Тиск стиснутого повітря	P_2	Па			
4	Ступень підвищення тиску	β	-			
5	Показник ротаметру	H_p	Діл.			
6	Продуктивність	M_k	кг/с			
7	Сила струму	I	А			
8	Напруга в мережі	U	В			
9	Потужність приводу	N	Вт			
10	ЕРС термопари	E	мВ			
11	Підвищення температури повітря при стисненні	Δt	°C			
12	Теоретична робота компресора	l_k	Дж/кг			
13	Теоретична потужність компресора	N_k	Вт			
14	Ефективний ККД компресора	η_c	%			
15	Експериментальна похибка	σ	%			

Протокол експериментальних та розрахункових даних
до лабораторної роботи №4

№ з/п	Найменування	Позначення	Номер досліду		
			1	2	3
1	Час початку досліду, год. хв.	τ			
2	Напруга живлення, В	U			
3	Сила струму, А	I			
4	Показник мілівольтметра, °С	t_{ci}	1		
			2		
			3		
			4		
			5		
			6		
5	Середня температура поверхні труби, °С	t_c			
6	Температура повітря, °С	$t_{жк}$			
7	Теплова потужність нагрівача, Вт	Q			
8	Поправка на теплообмін випромінюванням, Вт	Q_l			
9	Потужність конвективного теплообміну, Вт	Q_k			
10	Щільність теплового потоку, Вт/м ²	q_k			
11	Середній коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м ² ·°С)	α			
12	Критерій Нуссельта	N_u			
13	Критерій Грасгорфа	G_r			
14	Критерій Прандтля	P_r			
15	Похибка формули Міхеєва, %	σ			
16	Похибка визначення коефіцієнта тепловіддачі по приладах, %	γ_α			

Протокол експериментальних та розрахункових даних
до лабораторної роботи №5

№ з/п	Найменування параметру	Позначення	Розмірність	Величина	Показники термопар	Позиція термопар	t:	t:	t:
							°C	°C	°C
1	Напруга живлення	U	B			1			
2	Сила струму нагрівача	J	A			2			
3	Тепловий потік	Q	Bm			3			
4	Температура повітря	t_0	°C			4			
5	Середня температура внутрішньої поверхні ізоляції	\bar{t}_1	°C			5			
6	Середня температура зовнішньої поверхні ізоляції	\bar{t}_2	°C			6			
7	Коефіцієнт тепловіддачі ізоляції	α_2	$\frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ K}$			7			
8	Коефіцієнт теплопровідності ізоляції	$\lambda_{із}$	$\frac{Bm}{m^2 \cdot ^\circ K}$			8			
9	Критичний діаметр ізоляції	$d_{кр}$	m		9				
10	Похибка приладова	γ	%		10				
11	Похибка експериментальна	σ_0	%		τ	с			
					Час виміру				

ДОДАТОК 2

Фізичні властивості сухого повітря (В=760 мм.рт.ст.)

t	ρ	C_p	$\lambda \cdot 10^2$	$a \cdot 10^6$	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$	P_r
°C	кг/м ³	кДж/кг·К	Вт/м·К	м ² /с	н·с/м ²	м ² /с	-
10	1,247	1,005	2,51	20	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	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	1,06	1,005	2,9	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	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,1	0,69
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	27,8	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	34,85	0,68
250	0,674	1,038	4,27	61	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,6	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,6	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687