

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Український державний морський технічний університет
імені адмірала Макарова

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ, ПРОГРАМА І КОНТРОЛЬНІ
ЗАВДАННЯ З ДИСЦИПЛІНИ**

"ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ"

Рекомендовано Методичною радою УДМТУ

Миколаїв 2003

УДК 621.01.016

Димо Б.В. Методичні вказівки, програма і контрольні завдання з дисципліни "Теоретичні основи теплотехніки". – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 40 с.

Кафедра технічної теплофізики і суднових паровиробних установок

Методичні вказівки містять програму дисципліни "Теоретичні основи теплотехніки" і контрольні завдання для виконання контрольної роботи. Призначені для студентів заочної форми навчання напряму бакалаврської підготовки "Інженерна механіка" спеціальностей 7.090210 – "Двигуни внутрішнього згоряння" та 7.090202 – "Технологія машинобудування", можуть також використовуватися для виконання контрольних робіт з дисциплін "Технічна термодинаміка" та "Тепломасообмін" для студентів напряму бакалаврської підготовки 7.0905 – "Енергетика".

Рецензент канд. техн. наук, доцент О.А. Єпіфанов

© Український державний
морський технічний
університет, 2003
© Видавництво УДМТУ, 2003

ВСТУП

Дисципліна "Теоретичні основи теплотехніки" є загальнотехнічною дисципліною в системі підготовки бакалаврів з напрямку "Інженерна механіка" (спеціальності 8.090210 – "Двигуни внутрішнього згоряння", 8.090202 – "Технологія машинобудування") і присвячена вивченню законів взаємного перетворення енергії, термодинамічних методів розрахунку циклів теплових двигунів та аналізу їх ефективності, методів розрахунку процесів переносу теплоти, тощо. Дисципліна складається з двох основних розділів: технічна термодинаміка і тепломасообмін.

Основною метою викладання дисципліни є підготовка висококваліфікованих спеціалістів, здатних вирішувати на сучасному науково-технічному рівні проектні, дослідницькі і виробничо-технологічні задачі в галузі машинобудування.

Робочі процеси у двигунах внутрішнього згоряння, більшість сучасних виробництв супроводжуються теплотехнологічними процесами, від правильного ведення яких залежить ефективність двигунів, а також продуктивність і якість продукції. У зв'язку з цим, а також проблемами охорони навколишнього середовища і створення безвідходних технологій значно зростає і роль теплотехніки як науки.

Завданнями вивчення дисципліни є оволодіння:

основними поняттями, ознаками, положеннями і законами рівноважної термодинаміки;

методами аналізу ефективності циклів теплосилових установок;

загальними положеннями теорії тепло- і масопереносу і математичними методами розрахунку процесів тепло- і масообміну;

теоретичними основами сучасних методів вимірювання теплотехнічних величин, способами обробки і подання вимірювальної інформації.

Студент повинен знати:

загальні поняття, визначення і закони рівноважної термодинаміки;

основні співвідношення для політропних процесів;

математичні методи отримання диференціальних рівнянь термодинаміки;

методи термодинамічного дослідження прямих і зворотних газових і парових циклів;

методи аналізу ефективності циклів теплосилових установок;

основні поняття та визначення теорії тепло- і масообміну;

основні положення теорії теплопровідності при стаціонарному та нестаціонарному режимах;

основи теорії теплової подібності;

основні положення теорії конвективного теплообміну в однофазному середовищі;

основні положення теплообміну при фазових перетвореннях;

закони перенесення теплоти випромінюванням;

методику теплового розрахунку теплообмінних апаратів.

Студент повинен уміти:

виконувати інженерні розрахунки перетворення теплоти в прямих циклах теплових двигунів і зворотних циклах холодильних машин і установок;

виконувати розрахунки максимальної (граничної) працездатності потоку і теплоти, величини необоротних втрат в реальному циклі з наступним аналізом;

користуватися для розрахунків відповідними таблицями і діаграмами термодинамічних властивостей робочих тіл;

користуватися основними законами перенесення теплоти для розв'язання задач теплообміну;

експериментально визначати теплофізичні властивості речовин та коефіцієнти тепловіддачі конвективного теплообміну;

узагальнювати дослідні дані на основі теорії подібності;

користуватися теорією подібності для розв'язання задач теплообміну;

виконувати тепловий розрахунок теплообмінних апаратів.

ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

Тема 1

Предмет і метод технічної термодинаміки. Рекомендована література. Технічна термодинаміка як основа суднової енергетики. Термодинамічна система. Рівноважний, стаціонарний та нерівноважний стан. Термодинамічний процес. Час релаксації в реальному процесі. Параметри стану однорідного робочого тіла. Рівняння стану ідеального газу [6, с. 4–10; 13, с. 9–13].

Тема 2

Способи задання складу суміші. Співвідношення між масовими, об'ємними, мольними частками. Газова стала та умовна молярна маса суміші. Парціальний тиск, парціальний об'єм компонентів суміші. Парціальна та зведена густини компонентів та їх зв'язок з густиною суміші [6, с. 10–19; 13, с. 107–116].

Тема 3

Термічні і калоричні властивості газів. Дослідження теплоємності газів. Дослідження теплоємності речовин за молекулярно-кінетичною теорією. Теплоємності c_p і c_v . Коefіцієнт Пуассона. Рівняння Майєра [6, с. 10–15; 13, с. 79–83].

Тема 4

Теплота і робота як види передачі енергії. Закон збереження і перетворення енергії. Внутрішня енергія та зовнішня робота. Графічне відображення теплоти і роботи. Діаграми v – P та s – T , їх властивості. Ентальпія. Рівняння та формулювання першого закону термодинаміки, приклади їх застосування [6, с. 20–25].

Тема 5

Поняття політропного процесу. Виведення рівняння політропного процесу. Співвідношення між параметрами P , v , T . Розрахунок зміни внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії. Виведення формул розрахунку роботи. Розрахунок теплоти процесу (дослідження теплоємності політропного процесу). Способи визначення по-

казника політропи. Дослідження ізопроцесів. Сумісне графічне відображення основних політропних процесів в робочій та тепловій діаграмах. Графічне дослідження (розрахунок) політропних процесів [6, с. 185–203; 13, с. 129–153].

Тема 6

Повні та неповні диференціали в термодинаміці. Джерела теплоти та умови роботи теплового двигуна. Оборотні та необоротні процеси (цикли) та їх ефективність. Цикл Карно та його значення. Формулювання та рівняння другого закону. Ентропія. Принцип зростання ентропії в необоротних процесах. Значення другого закону термодинаміки [6, с. 40–47; 13, с. 26–65].

Тема 7

Корисна робота, максимальна корисна робота (ексергія). Ексергія теплоти і роботи. Рівняння Гюї–Стодоли. [6, с. 92–102].

Тема 8

Двотактні і чотиритактні двигуни. Індикаторна діаграма і теоретичний цикл. Теоретичний метод дослідження. Методика розрахунку. Середній цикловий (індикаторний) тиск. Потужність двигуна. Цикл ДВЗ зі згорянням пального при $P = \text{const}$. Цикл ДВЗ зі згорянням пального при $v = \text{const}$, а далі – при $P = \text{const}$. Приклади порівняння циклів. Деякі економічні показники роботи [6, с. 264–273].

Тема 9

Дійсна індикаторна діаграма і теоретичний цикл. Робота одноступеневого компресора при ізотермічному, адіабатному або політропному процесі стиснення. Вплив "шкідливого простору". Причини застосування багатоступеневого стиснення. Розрахунок багатоступеневого компресора [6, с. 220–229].

Тема 10

Течія газів і пари. Перший закон термодинаміки для газового потоку. Швидкість звуку та число Маха. Сопло і дифузор. Розрахунок геометричних сопел. Швидкість витікання газу (рідини).

Секундна масова витрата. Критичне відношення тисків. Критична, максимальна швидкість витікання та витрата газу. Методика розрахунку простих та комбінованих геометричних сопел. Параметри потоку при його повному адіабатичному гальмуванні [6, с. 229–252].

Тема 11

Принципова схема, цикл і дослідження газотурбінних установок з підводом теплоти при $P = \text{const}$ та $v = \text{const}$. Термічний ККД. Методи підвищення ККД циклів ГТУ: регенерація теплоти, багатоступеневе стиснення повітря, багатоступеневе підведення теплоти. ГТУ, які працюють за замкненим циклом. Робочі тіла замкнених схем [6, с. 273–293; 13, с.207–225].

Тема 12

Методи порівняння ККД оборотних і необоротних циклів. Середня інтегральна температура та еквівалентний цикл Карно. Приклади порівняння циклів за середньоінтегральними температурами підведення та відведення теплоти. Метод коефіцієнтів корисної дії в аналізі необоротних циклів [6, с. 252–258].

Тема 13

Термодинамічні властивості реальних газів. Коефіцієнт стисливості. Діаграми поведінки реальних газів. Критичні параметри речовин. Рівняння стану реальних газів. Принцип відповідних станів. [6, с.138–160; 13, с. 231–243].

Тема 14

Водяна пара. Основні поняття, v - P та s - h -діаграми стану. Таблиці теплофізичних властивостей води та водяної пари. Розрахунок процесів одержання перегрітої пари [13, с. 243–257].

Тема 15

Дослідження термодинамічних процесів з водяною парою в діаграмах v - P , s - T та s - h [13, с. 257–260].

Тема 16

Цикл Ренкіна – основний цикл паротурбінних установок:

зображення в діаграмах, термічний ККД та засоби його підвищення. Вплив початкових і кінцевих параметрів водяної пари. Проміжний перегрів пари. Цикл з необоротним адіабатним розширенням пари в турбіні. Регенерація теплоти в ПСУ. Цикл, схема і ККД установки з регенеративними відборами. Комбіновані цикли. Бінарний цикл: вимоги до робочих тіл, термічний ККД. Парогазові установки. Термодинамічні основи теплофікації. Особливості роботи і цикли атомних енергетичних установок [6, с. 293–326, 277–295].

Тема 17

Дроселювання реального і ідеального газів. Фізичні основи. Диференціальний та інтегральний дросель-ефект. Температура та криві інверсії. Дроселювання водяної пари. Адіабатне розширення з виробленням роботи [6, с. 203–215].

Тема 18

Оборотний цикл Карно та його значення в аналізі ефективності оборотних циклів. Схема, цикл і холодильний коефіцієнт повітряної холодильної установки. Цикл парокомпресорної холодильної установки. Вимоги до робочих тіл. Пароелектрична холодильна установка. Схема та принцип роботи абсорбційної холодильної установки. Цикл теплового насоса. Термотрансформатори [6, с. 334–367; 13, с. 295–312].

ТЕПЛО- І МАСООБМІН

Тема 1

Предмет тепло- і масообміну. Способи перенесення теплоти: теплопровідність, конвекція та випромінювання.

Температурне поле та його градієнт. Ізотермічна поверхня. Тепловий потік та його густина. Гіпотеза Фур'є. Коефіцієнт теплопровідності. Дослідні дані з теплопровідності речовин: металів, рідин, газів та пари, будівельних та теплоізоляційних матеріалів.

Фізичний опис процесів конвективного теплообміну. Вільна та вимушена конвекція. Фактори, які впливають на інтенсивність конвективного теплообміну: властивості рідин, режими течії,

примежовий шар, форма та розмір. Закон Ньютона–Ріхмана. Коефіцієнт тепловіддачі.

Природа теплового випромінювання. Закон Стефана-Больцмана. Ступінь чорноти тіл. Абсолютно чорні та сірі тіла. Поглинальна, відбивна та пропускна здатність тіл. Види променевих потоків. Спектри випромінювання.

Рекомендована література

Основна: [10, гл. 1, с. 8–12; гл. 2, с. 34–38; гл. 5, с. 160–164].

Додаткова: [4, гл. 1, с. 7–16; гл. 4, с. 108–112; гл. 16, с. 312–317].

Тема 2

Диференціальні рівняння теплообміну: енергії, руху, тепловіддачі та суцільності. Крайові умови (умови однозначності).

Основні положення теорії подібності. Числа подібності та їх фізичний зміст. Теореми подібності. Рівняння подібності. Умови подібності для процесів конвективної тепловіддачі. Узагальнення дослідних даних на основі теорії подібності. Визначальні температура і розмір. Методи експериментального визначення коефіцієнтів тепловіддачі. Обробка дослідних даних: осереднення температури поверхні нагріву, осереднення температури рідини по поперечному перерізу і довжині каналу, визначення температурних напорів. Отримання емпіричних критеріальних рівнянь.

Рекомендована література

Основна: [10, гл. 2, с. 38–68; гл. 3, с. 77, с. 82–84].

Додаткова: [4, гл. 4, с. 112–119; гл. 5, с. 129–146; гл. 6, с. 146–155].

Тема 3

Диференціальне рівняння теплопровідності. Коефіцієнт температуропровідності. Умови однозначності для процесів теплопровідності. Граничні умови першого, другого, третього і четвертого родів.

Теплопровідність плоскої та циліндричної стінок при граничних умовах першого роду. Тепловий потік через стінку. Термічний опір стінки. Температурне поле стінки при постійному і змінному коефіцієнтах теплопровідності. Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності багатошарової стінки.

Теплопровідність плоскої та циліндричної стінок при граничних умовах третього роду (теплопередача). Коефіцієнт теплопередачі. Загальний термічний опір теплопередачі.

Теплова ізоляція. Критичний діаметр теплової ізоляції.

Інтенсифікація процесів теплопередачі. Інтенсифікація теплопередачі за рахунок оребрення стінок. Теплопровідність ребер різної форми. Ефективність оребрених поверхонь.

Нагрівання (охолодження) тіла у середовищі з постійною температурою. Критерії Біо та Фур'є.

Регулярний тепловий режим та його математичний опис. Темп охолодження та його визначення. Теореми Кондратьєва. Практичне застосування теорії регулярного режиму.

Наближені методи розв'язання задач теплопровідності (метод кінцевих різниць, метод аналогії).

Рекомендована література

Основна: [10, гл. 2, с. 39–41; гл. 1, с. 13–24; гл. 6, с. 196–209, 212–245; гл. 10, с. 300–315].

Додаткова: [4, гл. 1, с. 16–24; гл. 2, с. 24–40, 44–56; гл. 3, с. 66–107].

Тема 4

Вільна конвекція. Характер руху рідини поблизу вертикальної стінки. Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від вертикальної поверхні при вільній конвекції. Критеріальні рівняння для тепловіддачі при вільній конвекції у великому об'ємі. Особливості розрахунку рідинних та газових прошарків.

Вимушена конвекція. Тепловіддача при обтіканні плоскої поверхні (пластини). Гідродинамічні умови розвитку процесу. Критеріальні рівняння для розрахунку тепловіддачі.

Тепловіддача при течії рідини в каналах. Особливості руху рідини в каналах. Режими руху. Ділянки гідродинамічної і теплової стабілізації. Результати експериментальних досліджень з тепловіддачі в каналах. Розрахункові рівняння. Розрахунок тепловіддачі в зігнутих трубах.

Тепловіддача при поперечному обтіканні круглого циліндра. Вплив на тепловіддачу початкової турбулентності потоку і кута атаки. Характер руху рідини та тепловіддача в коридорних та шахових пучках труб.

Рекомендована література

Основна: [10, гл. 3, с. 69–110].

Додаткова: [4, гл. 7, с. 155–173; гл. 9, с. 192–200; гл. 10, с. 201–210; 11, с. 166–180].

Тема 5

Механізм процесу теплообміну при пазирковому кипінні одноконтонентної рідини в умовах вільного руху. Залежність коефіцієнта тепловіддачі і густини теплового потоку від температурного напору при кипінні у великому об'ємі. Умови виникнення і механізм плівкового кипіння. Перша і друга критичні густини теплового потоку. Загальні та окремі емпіричні залежності для коефіцієнта тепловіддачі при кипінні у великому об'ємі.

Теплообмін при кипінні рідини в трубах. Характер руху парорідинної суміші у горизонтальних та вертикальних трубах.

Основні положення теплообміну при конденсації чистої пари. Теплообмін при плівковій конденсації нерухокої сухої насиченої пари на вертикальній стінці. Ламінарна та турбулентна течія плівки конденсату. Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі при плівковій конденсації.

Вплив перегріву пари, стану поверхні, вмісту у парі неконденсуючих газів, швидкості і напрямку течії пари, а також компонування поверхні нагріву на теплообмін при конденсації.

Рекомендована література

Основна: [10, гл. 4, с. 110–154].

Додаткова: [4, гл. 12, с. 226–250; гл. 13, с. 250–282].

Тема 6

Закони випромінювання для абсолютно чорного тіла. Закони Планка та Віна. Інтегральне випромінювання. Закон Стефана-Больцмана. Закон Кірхгофа – зв'язок між випромінювальною та поглинальною здатністю тіла. Інтенсивність (яскравість) випромінювання. Закон Ламберта.

Теплообмін випромінюванням між двома тілами. Кутові коефіцієнти випромінювання та їх властивості. Теплообмін випромінюванням при наявності екранів.

Теплове випромінювання газів. Закон Бугера. Коефіцієнт по-

глинання. Об'ємна інтенсивність власного випромінювання середовища. Радіаційно-конвективний теплообмін.

Рекомендована література

Основна: [10, гл. 5, с. 160–193].

Додаткова: [4, гл. 16, с. 312–326; гл. 17, с. 326–360; гл. 18, с. 360–379].

Тема 7

Класифікація теплообмінних апаратів. Рекуперативні, регенеративні та змішувальні теплообмінники. Розрахунок рекуперативних теплообмінних апаратів. Основні рівняння для їх теплового розрахунку: рівняння теплопередачі та теплового балансу. Формули для коефіцієнтів теплопередачі. Середня різниця температур та методи її обчислення в залежності від схеми руху теплоносіїв. Розрахунок кінцевих температур теплоносіїв. Методи інтенсифікації процесів перенесення теплоти в теплообмінниках.

Рекомендована література

Основна: [10, гл. 8, с. 245–266].

Додаткова: [4, гл. 19, с. 379–394; 11, с. 7–18, 113–127, 135–141, 141–143, 152–16].

КОНТРОЛЬНА РОБОТА

Загальні методичні вказівки

Згідно з навчальними планами студенти заочної форми навчання виконують контрольну роботу з дисципліни "Теоретичні основи теплотехніки", яка включає по п'ять задач і запитань. Відповідати на запитання та розв'язувати задачі треба суворо дотримуючись свого варіанта. Номер варіанта визначається з таблиці варіантів (табл. 1) у залежності від двох останніх цифр номера залікової книжки студента – шифру студента. Якщо номер залікової книжки 98023, то шифром студента є цифра 23. Згідно з цим шифром студент відповідає на контрольні запитання 5, 18, 25, 32, 45 (див. табл. 1). Умови задач і формулювання контрольних запи-

тань повинні бути переписані повністю. Розв'язання задач слід супроводжувати стислими поясненнями та докладними розрахунками. Необхідно вказувати одиниці всіх величин. При розв'язанні задач можна використовувати спеціальні математичні програми для ЕОМ (MathCad, MathLab та інші). Відповіді на контрольні запитання повинні бути стислими, але вичерпними. Не слід списувати відповіді з підручника.

При виборі розрахункових формул слід робити посилання на літературне джерело, а в кінці контрольної роботи навести повний список використаних джерел.

Студенти, які навчаються за спеціальністю 8.090210 "Двигуни внутрішнього згоряння", виконують контрольні задачі № 2, 3, 6, 7, 9.

Студенти, які навчаються за спеціальністю 8.090202 "Технологія машинобудування", виконують контрольні задачі № 1, 4, 5, 8, 10.

Таблиця 1. Варіанти контрольних запитань

Номер варіанта	Шифр студента	Номери запитань	Номер варіанта	Шифр студента	Номери запитань
1	01, 51	1, 11, 22, 33, 44	21	21, 71	3, 16, 29, 36, 43
2	02, 52	2, 13, 24, 35, 45	22	22, 72	4, 17, 30, 37, 44
3	03, 53	1, 14, 25, 36, 47	23	23, 73	5, 18, 25, 32, 45
4	04, 54	4, 15, 26, 87, 48	24	24, 74	6, 19, 26, 33, 46
5	05, 55	5, 16, 27, 38, 49	25	25, 75	7, 20, 27, 34, 41
6	06, 56	6, 17, 28, 39, 50	26	26, 76	6, 15, 22, 35, 42
7	07, 57	7, 18, 29, 40, 49	27	27, 77	9, 16, 23, 36, 49
8	08, 58	8, 19, 30, 39, 48	28	28, 78	10, 17, 24, 31, 44
9	09, 59	9, 20, 29, 38, 47	29	29, 79	1, 14, 21, 34, 47
10	10, 60	10, 19, 28, 37, 46	30	30, 80	2, 15, 22, 35, 48
11	11, 61	2, 14, 26, 38, 50	31	31, 81	4, 18, 24, 38, 44
12	12, 62	3, 26, 27, 39, 47	32	32, 82	5, 19, 25, 39, 45
13	13, 63	4, 15, 28, 40, 48	33	33, 83	6, 20, 26, 32, 46
14	14, 64	5, 17, 29, 37, 41	34	34, 84	7, 15, 27, 38, 47
15	15, 65	6, 19, 30, 38, 42	35	35, 85	8, 14, 28, 34, 48
16	16, 66	7, 19, 27, 31, 43	36	36, 86	9, 15, 29, 35, 49
17	17, 67	8, 20, 28, 32, 44	37	37, 87	10, 16, 30, 36, 50
18	18, 68	9, 11, 21, 33, 45	38	38, 88	1, 15, 21, 36, 42
19	19, 69	10, 12, 22, 34, 46	39	39, 89	2, 11, 29, 32, 41
20	20, 70	1, 13, 25, 37, 49	40	40, 90	3, 12, 22, 31, 43

Продовж. табл. 1

Номер варіанта	Шифр студента	Номери запитань	Номер варіанта	Шифр студента	Номери запитань
41	41, 91	10, 12, 27, 32, 47	46	46, 96	1, 17, 22, 37, 42
42	42, 92	9, 13, 28, 33, 48	47	47, 97	2, 18, 23, 38, 43
43	43, 93	8, 14, 29, 34, 49	48	48, 98	3, 19, 24, 39, 44
44	44, 94	7, 15, 30, 35, 50	49	49, 99	4, 20, 25, 40, 45
45	45, 95	6, 16, 21, 36, 41	50	50, 00	5, 11, 26, 31, 46

КОНТРОЛЬНІ ЗАДАЧІ

Задача № 1. Газ масою M , кг, з початковим тиском $P_1 = 0,1$ МПа і початковою температурою t_1 , °С, стискається до зменшення в об'ємі у ϵ разів. Стиснення проводиться за ізотермою, адіабатою, політропою з показником політропи n .

Визначити для кожного процесу початковий об'єм газу, тиск та температуру газу наприкінці процесу стиснення, роботу стиснення та кількість підведеної або відведеної теплоти в процесі, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії газу. Указати, який процес найбільш ефективний (за витраченою роботою).

Зобразити відносне розміщення процесів в v - P і s - T -діаграмах. На графіках процесів указати числові значення отриманих параметрів.

Вид газу, ступінь стиснення ϵ і початкову температуру t_1 вибрати за останньою цифрою шифру студента з табл.1.1. Масу газу M , кг, та показник політропи n вибрати з табл.1.1 за передостанньою цифрою шифру. Результати розрахунків звести до табл. 1.2.

Таблиця 1.1

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Газ	He	CO	H ₂	N ₂	O ₂	O ₂	Ne	CH ₄	Ar	Повітря
Температура t_1 , °С	37	17	47	57	27	67	7	77	87	37
Маса газу M , кг	7	5	6	9	5	11	13	20	15	14
Показник політропи n	1,1	1,2	1,3	1,15	1,55	1,4	1,5	1,45	1,6	1,25
Ступінь стиснення ϵ	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	10

Таблиця 1.2

Процес	Розрахункові величини								
	v_1	v_2	P_2	t_2	L	Q	ΔU	ΔH	Δs
	м ³ /кг		МПа	°С	кДж				кДж/К
Ізотермічний									
Адіабатний									
Політропний									

Задача № 2. У парогенератор надходить 100 кг води під тиском P , МПа, і з температурою t_1 , °С. Визначити:

кількість теплоти, необхідної для нагріву води до температури кипіння; для отримання вологої насиченої пари зі ступенем сухості x ; сухої насиченої пари; перегрітої пари з температурою $t_{п.п}$;

термічні та калоричні параметри на початку та наприкінці зазначених процесів. Зобразити ці процеси в v - P , s - T і s - h -діаграмах.

Необхідні дані вибрати з табл. 2.1 і 2.2, результати звести до табл. 2.3. Початкові параметри вибрати за останньою цифрою шифру, температуру перегрітої пари – за передостанньою цифрою.

Таблиця 2.1

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Тиск P , МПа	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0
Температура води t_1 , °С	20	25	30	15	35	40	45	50	60	70

Таблиця 2.2

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Ступінь сухості x	0,75	0,80	0,85	0,9	0,93	0,95	0,7	0,8	0,92	0,8
Температура перегрітої пари $t_{п.п}$, °С	290	300	295	310	350	400	450	500	600	400

Таблиця 2.3

Номер точки	Агрегатний стан	P , МПа	t , °С	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)
a_0						
a'						
a_x						
a''						
$a_{п.п}$						

Задача № 3. Визначити максимальні температуру і тиск ідеального циклу двигуна внутрішнього згорання зі змішаним підведенням теплоти (цикл Трінклера), питому кількість підведеної q_1 і відведеної q_2 , кДж/кг, теплоти, питому роботу циклу l , кДж/кг, при заданих ступені адіабатного стиснення $\varepsilon = v_1/v_2$, ступені підвищення тиску $\lambda = P_3/P_2$ і ступені попереднього розширення $\rho' = v_4/v_3$. Початковий тиск P_1 , МПа, початкова температура t_1 , °С, тиск після адіабатного розширення P_5 . Теплоємності робочого тіла вважати сталими: $c_v = 0,72$ кДж/(кг·К), $c_p = 1,01$ кДж/(кг·К).

У скільки разів термічний ККД циклу Карно, який здійснюється у тому ж температурному інтервалі, більший за ККД заданого циклу?

Значення величин ε , λ і ρ' вибрати з табл. 3.1 за останньою цифрою, а величини P_1 , t_1 і P_5 – з табл. 3.2 за передостанньою цифрою шифру.

Таблиця 3.1

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Ступінь стиснення ε	12			13			14			
Ступінь підвищення тиску λ	1,81	1,75	1,7	1,65	1,6	1,65	1,70	1,75	1,8	1,85
Ступінь попереднього розширення ρ	1,35			1,4		1,45			1,35	

Таблиця 3.2

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Початковий тиск P_1 , МПа	0,1									
Початкова температура t_1 , °С	0	7	17	27	37	47	37	27	17	0
Тиск після адіабатного розширення P_5 , МПа	0,21		0,22		0,23		0,24		0,25	

Задача № 4. Визначити питому витрату теплоти (кількість теплоти, витраченої на відведення 1 кг вологи) при сушінні в теоретичній сушарці за умов:

температура зовнішнього повітря t_a , відносна вологість φ_a ;

температура повітря після калорифера t_b (вибрати з табл. 4.2);

в процесі сушки (адіабатного насичення повітря водяною парою при $h = \text{const}$) температура вологого повітря зменшується на $\Delta t = 5$ °С;

барометричний тиск $B = 745$ мм рт. ст.

Параметри повітря t_a і φ_a вибрати за останньою цифрою шифру, параметри повітря після калорифера – за передостанньою. Задачу розв'язати аналітично та за допомогою d - h -діаграми вологого повітря. Процеси в теоретичній сушарці зобразити на d - h -діаграмі.

Таблиця 4.1

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура t_a , °С	10	15	20	25	30	20	10	15	20	25
Відносна вологість φ_a , %	5	10	15	20	25	30	25	20	15	10

Таблиця 4.2

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура t_b , °С	40	45	50	55	60	40	45	50	55	60

Задача № 5. Повітря, об'ємною витратою V , м³/год, при t_1 , °C, і $P_1 = 0,1$ МПа, стискається адіабатно до P_2 , МПа.

Визначити температуру повітря наприкінці стиснення, теоретичну роботу компресора і необхідну потужність двигуна для одного двоступеневого компресора з проміжним охолодженням повітря до початкової температури та порівняти їх ефективність.

Зобразити процеси одно- та двоступеневого стиснення в v - P та s - T -діаграмах з зазначенням розрахункових величин.

Значення V і t_1 вибрати з табл. 5.1 за останньою цифрою, а значення P_2 – за передостанньою цифрою шифру.

Таблиця 5.1

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Витрата V , м ³ /год	150	200	300	400	500	600	700	800	900	400
Температура t_1 , °C	17	27	17	27	17	27	17	27	17	27
Тиск наприкінці стиснення P_2 , МПа	0,8	0,6	1,2	0,5	0,8	1,0	1,2	0,8	1,4	0,9

Задача № 6. Для аміачної парокомпресорної холодильної установки визначити:

параметри робочого тіла у вузлових точках циклу;

холодопродуктивність та кількість відведеної теплоти за умови повної конденсації пари в конденсаторі;

роботу компресора;

холодильний коефіцієнт та ступінь сухості пари холодоагента перед випарником, якщо конденсат у конденсаторі не переохолоджується, а у випарнику холодоагент перетворюється на суху насичену пару.

Процес стиснення у компресорі вважати адіабатним. Абсолютний тиск у випарнику P_1 , абсолютний тиск у конденсаторі P_2 . Витрата холодоагента M , кг/с.

Задачу розв'язати за допомогою t - s -діаграми аміаку. Тиск у випарнику P_1 та витрату M вибрати з табл. 6.1 за останньою цифрою шифру, тиск P_2 у конденсаторі – за предостанньою цифрою шифру.

Результати розрахунків звести до табл. 6.2 та 6.3.

Таблиця 6.1

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Тиск у випарнику P_1 , МПа	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	0,4	0,6	0,8
Витрата холодо- агента M , кг/с	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	0,5	0,8	0,9	1	1,2
Тиск у конденса- торі P_2 , МПа	5	6	7	8	9	10	12	5	6	7

Таблиця 6.2

Номер вузлової точки	t , °C	P , МПа	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)
1					
2					
3					
4					
5					

Таблиця 6.3

Холодопродук- тивність Q_2 , кВт	Кількість відведе- ної теплоти Q_1 , кВт	Робота компре- сора L , кВт	Холодильний коефіцієнт ϵ_x

Задача № 7. По трубі з внутрішнім діаметром d , мм, рухається вода зі швидкістю w , м/с. Температура внутрішньої поверхні труби підтримується постійною і дорівнює $t_{ст}$, °C. Вода нагрівається у трубі від t_1 , °C, на вході до t_2 , °C, на виході. Визначити коефіцієнт тепловіддачі α . Дані для розрахунків вибрати з табл. 7.1 за останньою цифрою шифру, з табл. 7.2 – за передостанньою цифрою шифру.

Результати розрахунків звести до табл. 7.3.

Таблиця 7.1

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Діаметр труби d , мм	40	38	36	34	32	30	32	34	36	38
Температура стінки $t_{ст}$, °C	30	40	50	60	70	80	80	80	60	45

Таблиця 7.2

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Швидкість води w , м/с	9	10	11	12	13	14	15	14	12	10
Температура води на вході t_1 , °C	10	8	12	11	7	6	10	9	14	15
Температура води на виході t_2 , °C	20	22	25	30	29	24	24	21	25	25

Таблиця 7.3

Фізичні параметри					Критерії					Режим течії	Коефіцієнт тепловід- дачі α , Вт/(м ² ·К)
ν , м ² /с	β , К ⁻¹	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·м ³)	Pr_f	$Pr_{ст}$	Gr_f	Re_f	Nu_f		

Задача № 8. У повітроохолоджувачі установки кондиціонування витрата повітря складає V , м³/с, барометричний тиск $B = 745$ мм рт. ст., температура $t_1 = 50$ °C і відносна вологість $\varphi = 20$ %. Повітря охолоджується до температури t_2 , °C. Визначити кількість відведеної теплоти і кількість вологи, що висаджується на поверхні охолоджувача.

Задачу розв'язати аналітично та за допомогою d - h -діаграми вологого повітря. Витрату повітря V вибрати з табл. 8.1 за останньою цифрою шифру, а температуру t_2 – за передостанньою цифрою шифру.

Таблиця 8.1

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура t_2 , °C	5	10	7	15	8	12	4	0	17	18
Витрати повітря V , м ³ /с	10	2	1	4	6	5	8	1,5	3	9

Задача № 9. Судновий паровий повітропідігрівник виготовлений із горизонтальних латунних труб розміром $d_{\text{зов}} \times \delta_{\text{ст}}$ ($d_{\text{зов}}$ – зовнішній діаметр труби, $\delta_{\text{ст}}$ – товщина стінки). По трубах рухається повітря об'ємною витратою V , м³/год (при нормальних фізичних умовах), яке підігрівається від температури на вході $t_{\text{п}}^{\text{вх}}$, °C, до кінцевої температури на виході $t_{\text{п}}^{\text{вих}}$. Зовні труби підігріваються сухою насиченою паром з тиском P_s , МПа.

Визначити потрібну довжину труб, поверхню нагріву та витрату насиченої пари. Вважати пару нерухомою, переохолодженням конденсату знехтувати.

Витрату повітря V , розмір труби, температури повітря на вході і на виході вибрати з табл. 9.1 за передостанньою цифрою шифру. Тиск пари P_s , температуру стінки $t_{\text{ст}}$ та кількість труб n вибрати з табл. 9.2 за останньою цифрою шифру.

Таблиця 9.1

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Витрата повітря $V \cdot 10^{-2}$, м ³ /год	45	46	47	47,5	48	49	50	51	52	54
Розмір труби $d_{\text{зов}} \times \delta_{\text{ст}}$, мм	22 x 2,5					38 x 3,0				
Температура на вході $t_{\text{п}}^{\text{вх}}$, °C	-5	-3	-1	0	2	4	6	8	10	12
Температура на виході $t_{\text{п}}^{\text{вих}}$, °C	75		80		85		90		95	

Таблиця 9.2

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Кількість труб n , шт.	120	130	140	145	150	155	160	165	170	175
Тиск пари P_s , МПа	0,2		0,25		0,3		0,35		0,4	
Температура стінки $t_{\text{ст}}$, °C	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99

Задача № 10. Визначити товщину ізоляції трубопроводу діаметром d , мм, необхідну для запобігання випаданню вологи повітря на її поверхні. Трубопроводом рухається рідина з температурою t_p , °С. Температура повітря в приміщенні t_n , °С, а його відносна вологість φ_n , %. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу ізоляції λ_{i3} , Вт/(м·К). Коефіцієнт тепловіддачі від повітря до поверхні ізоляції α , Вт/(м²·К).

Температуру зовнішньої поверхні стінки трубопроводу взяти рівною температурі рідини.

Температуру точки роси визначити за допомогою d - h -діаграми вологого повітря для барометричного тиску повітря $B = 745$ мм рт. ст.

Діаметр трубопроводу d , температури рідини t_p і повітря t_n , а також відносну вологість φ_n вибрати з табл. 10.1 за передостанньою цифрою шифру. Коефіцієнти теплопровідності λ_{i3} та тепловіддачі α вибрати з табл. 10.2 за останньою цифрою шифру.

Таблиця 10.1

Параметри, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Діаметр труби d , мм	34		36		38		40		42	
Температура рідини t_p , °С	1	2	3	4	5	4	3	2	1	0
Температура повітря t_n , °С	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Відносна вологість φ_n , %	65	70	75	80	85	90	95	80	85	70

Таблиця 10.2

Параметр, одиниця виміру	Значення за варіантами									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Коефіцієнт теплопровідності λ_{i3} , Вт/(м·К)	0,1		0,12		0,14		0,15		0,1	
Коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/(м ² ·К)	6		7		8		9		10	

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які з нижчеперерахованих величин є функціями стану, а які є функціями процесу: внутрішня енергія, робота розширення (стиснення), ентропія, ентальпія, теплота?

2. Який фізичний зміст газової сталості?

3. Поясніть, чому ізобарна теплоємність більша за ізохорну?
4. Отримайте формули співвідношень між параметрами P , v і T для основних термодинамічних процесів.
5. Напишіть та поясніть рівняння першого закону термодинаміки для основних термодинамічних процесів.
6. Напишіть формули для розрахунку питомої роботи зміни об'єму для кожного з основних процесів.
7. Поясніть, за рахунок чого в адіабатному процесі розширення температура газу зменшується, а при стисненні збільшується.
8. Напишіть рівняння політропного процесу і покажіть, яке значення має показник політропи для основних процесів.
9. Напишіть рівняння для теплоємності політропного процесу і покажіть, як визначається з цього рівняння теплоємність основних процесів.
10. Покажіть в v - P і s - T -діаграмах області процесів з підведенням і відведенням теплоти.
11. Покажіть в v - P і s - T -діаграмах області процесів зі збільшенням та зменшенням внутрішньої енергії.
12. Поясніть, чому в політропних процесах $1 < n < k$ з підведенням теплоти температура газу зменшується, а при відведенні теплоти збільшується?
13. Як змінюється внутрішня енергія у круговому процесі?
14. Порівняйте питому вагу сухого та вологого повітря для нормальних фізичних умов.
15. Які величини характеризують склад вологи в повітрі?
16. При яких сталих параметрах відбуваються процеси нагрівання та адіабатного зволоження повітря? Як зображаються ці процеси в d - h -діаграмі?
17. Поясніть перевагу побудови і розрахунку процесів пароутворення в s - h -діаграмі.
18. В якому процесі з водяною парою робота здійснюється за рахунок зміни внутрішньої енергії? Зобразити цей процес в s - h -діаграмі.
19. Яка стадія пароутворення є ізобарно-ізотермічною. Проілюструйте цей процес у v - P , s - T і s - h -діаграмах.
20. З чим пов'язана необхідність багатоступеневого стиснення в компресорах?
21. Поясніть, чому стиснення газів в багатоступеневому компресорі більш економічне, ніж в одноступеневому?

22. Як ілюструє другий закон термодинаміки прямий цикл Карно? Які теплові машини працюють відповідно до цього закону?

23. Зробіть аналіз рівняння термічного ККД циклу Карно. Які висновки та формулювання другого закону термодинаміки виходять із нього?

24. Вкажіть способи підвищення термічного ККД циклів паросилових установок. Проілюструйте ці способи за допомогою s - T -діаграми.

25. Поясніть термодинамічні основи теплофізичного циклу.

26. Як і в якій області стану водяної пари можна здійснити роботу паросилової установки за циклом Карно?

27. Які величини характеризують ефективність роботи холодильної установки?

28. Зобразьте в v - P і s - T -діаграмах цикл двигуна внутрішнього згоряння зі змішаним підведенням теплоти і поясніть принцип дії.

29. Зобразьте в v - P і s - T -діаграмах цикл Дизеля і поясніть принцип дії.

30. Сформулюйте основний закон теплопровідності (закон Фур'є) і запишіть його математичне рівняння.

31. Поясніть зміст температурного градієнта та коефіцієнта теплопровідності.

32. Поясніть, чому у сухих пористих матеріалах низький коефіцієнт теплопровідності. Як змінюється їх теплопровідність за умов насичення вологою?

33. Поясніть, чому для циліндричної стінки можливе збільшення витрат теплоти крізь ізоляцію зі збільшенням товщини ізоляції.

34. Побудуйте графік розподілу температур у тришаровій плоскій стінці за умов $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ та поясніть, який зв'язок існує між падінням температур в окремих прошарках та їх коефіцієнтами теплопровідності.

35. Запишіть основний закон конвективного теплообміну, дайте фізичний опис цього виду теплообміну.

36. Які основні фактори і в якому напрямку впливають на коефіцієнт тепловіддачі?

37. Напишіть основні диференціальні рівняння конвективного теплообміну і сформулюйте крайові умови до них.

38. Що таке теплопередача? Поясніть фізичний зміст коефіцієнта теплопередачі.

39. Назвіть способи інтенсифікації теплопередачі.

40. Сформулюйте загальні положення теорії теплової подібності.

41. Наведіть критеріальні залежності теплообміну вільною та вимушеною конвекцією.

42. Наведіть рівняння теплового потоку для переносу теплоти теплопровідністю крізь плоску, циліндричну та сферичну стінки.

43. Наведіть рівняння теплового потоку для теплопередачі крізь плоскі, циліндричні та сферичні стінки.

44. Що таке конденсація пари? Які види конденсації бувають? Які фактори впливають на конденсацію пари?

45. Що таке кипіння рідини? Як залежать густина теплового потоку та коефіцієнт тепловіддачі від температурного напору?

46. Поясніть фізичний зміст процесу теплообміну випромінюванням.

47. Які оптичні властивості тіл впливають на випромінювання тіл?

48. Поясніть зміст законів Планка, Стефана–Больцмана, Віна та Кірхгофа.

49. Що таке теплообмінник? Які методики теплових розрахунків існують? Наведіть рівняння енергетичного балансу та теплопередачі.

50. Як визначається середній температурний напір теплоносіїв у теплообміннику?

51. Вкажіть, яка схема руху теплоносіїв більш ефективна і чому?

ПОЯСНЕННЯ ДО ЗАДАЧ

Задача № 1. Для розв'язання задачі потрібно використовувати розрахункові залежності для термодинаміки параметрів і функцій процесів та стану, наведені у табл. 1 та 2.

Таблиця 2. Співвідношення термодинамічних параметрів

Термодинамічний процес	Розрахункові залежності
Ізотермічний	$T = \text{const} \quad P_1 v_1 = P_2 v_2$
Адіабатний	$P_1 v_1^k = P_2 v_2^k$; $T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{k-1}$; $T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(k-1)/k}$

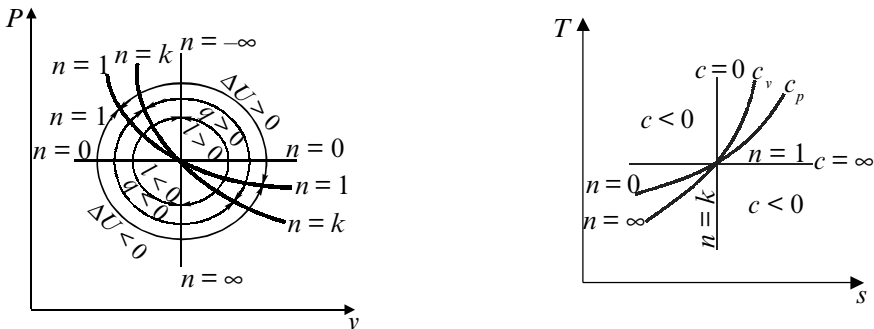
Продовж. табл. 2

Термодинамічний процес	Розрахункові залежності
Політропний	$P_1 v_1^n = P_2 v_2^n;$ $T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{n-1};$ $T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(n-1)/n}$

Таблиця 3. Функції процесів та стану

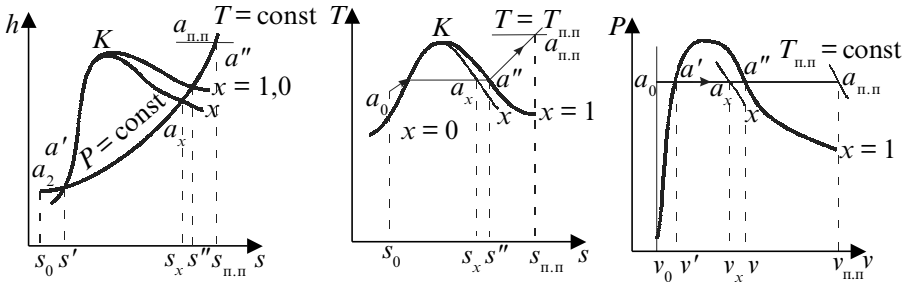
Термодинамічний процес	Розрахункові залежності
Ізотермічний	$l_{1-2} = RT \ln P_1/P_2 = P_1 v_1 \ln v_2/v_1 = P_1 V_1 \ln P_1/P_2;$ $\Delta h = h_2 - h_1 = 0; q_{1-2} = l_{1-2}; \Delta u = u_2 - u_1 = 0;$ $\Delta s = s_2 - s_1 = R \ln(P_1/P_2) - R \ln(v_2/v_1)$
Адіабатний	$l_{1-2} = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{1}{k-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2);$ $q = 0; \Delta u = u_2 - u_1 = -l, \Delta s = s_2 - s_1 = 0;$ $\Delta h = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$
Політропний	$l_{1-2} = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{P_1 v_1}{n-1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) =$ $= \frac{1}{n-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) = \frac{RT_1}{n-1} [1 - (v_1/v_2)^{n-1}];$ $q_{1-2} = c_v \frac{k-n}{n-1} (T_1 - T_2) = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) =$ $= c_n (T_2 - T_1); \Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1);$ $\Delta h = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1); \Delta s = s_2 - s_1 = c_n \ln T_2/T_1$

Графічне зображення основних термодинамічних процесів наведено на "троянді" політроп:



"Троянда" політроп

Задача № 2. Для розв'язання задачі слід ознайомитись з діаграмами v - P , s - T , s - h води та водяної пари:



Якщо a_0 – це точка початкового стану води, недогрітої до кипіння, то при подальшому підведенні теплоти до води при незмінному тиску P її стан послідовно змінюється до стану насичення (т. a'), вологій насиченої пари (т. a_x), сухої насиченої пари (т. a'') і перегрітої пари (т. $a_{п.п.}$).

У зв'язку з тим, що для ізобарного процесу підведена теплота розраховується за різницею ентальпій рідини або пари, то кількість підведеної питомої теплоти процесу слід розраховувати за виразом

$$q = h_2 - h_1 \text{ кДж/кг,}$$

де h_2 та h_1 – значення ентальпії речовини наприкінці та на початку процесу.

Для кінцевого значення маси M загальна теплота складає

$$Q = Mq \text{ кДж.}$$

Значення ентальпії води та водяної пари визначаються за допомогою s - h -діаграми та таблиць термодинамічних властивостей води та водяної пари.

Для стану вологій насиченої пари слід використовувати наступні розрахункові залежності:

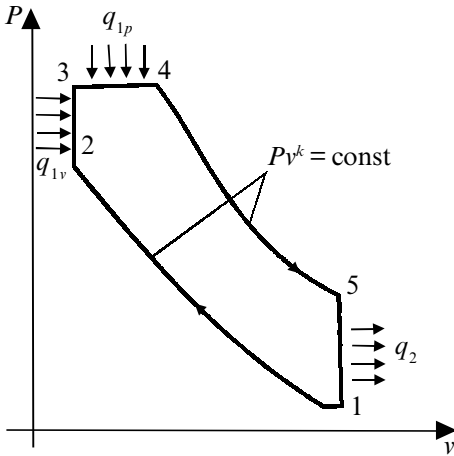
$$\text{питомий об'єм: } v_x = v' + x(v'' - v');$$

$$\text{ентальпія: } h_x = h' + xr;$$

$$\text{ентропія: } s_x = s' + x(s'' - s');$$

Індекси ' та '' означають стан насичення рідини та сухої насиченої пари. Ступінь сухості пари – x , питома теплота пароутворення (конденсації) – r .

Задача № 3. Розв'язання задачі слід починати з графічного зображення у v - P , s - T -діаграмах циклу ДВЗ зі змішаним підведенням теплоти.



Максимальну температуру цикл має в точці 4 після підведення теплоти, а максимальний тиск – в точках 3 і 4. Визначимо T_4 і P_3 .

1. Показник адіабати $k = c_p / c_v$.

2. Тиск і температура в точці 2: $P_2 = P_1(v_1/v_2)^k = P_1 \epsilon^k$; $T_2/T_1 = P_2 v_2 / P_1 v_1 = \epsilon^k \cdot 1/\epsilon = \epsilon^{k-1}$.

3. Тиск і температура в точці 3: $P_3 = \lambda P_2$; $T_3/T_2 = = P_3 v_3 / P_2 v_2 = P_3 / P_2 = \lambda$.

4. Тиск і температура в точці 4: $P_4 = P_3$; $T_4/T_3 = = P_4 v_4 / P_3 v_3 = \rho$.

5. Тиск і температура в точці 5: $T_5/T_1 = P_5 v_5 / P_1 v_1 = P_5 / P_1$.

6. Питома кількість підведеної теплоти:

в ізохорному процесі $q_{1v} = c_v (T_3 - T_2)$;

в ізобарному процесі $q_{1p} = c_p (T_4 - T_3)$;

сумарна $q_1 = q_{1v} + q_{1p}$.

7. Питома кількість відведеної теплоти $q_2 = c_v (T_5 - T_1)$.

8. Питома робота циклу $l = q_1 - q_2$.

9. Термічний ККД циклу Трінклера $\eta_t = 1 - q_2/q_1 = l/q_1$.

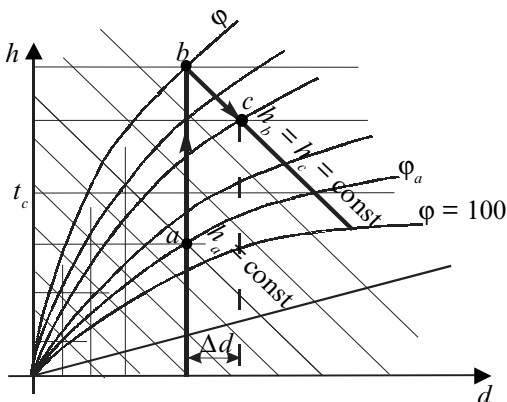
10. Термічний ККД циклу Карно

$$\eta_{tk} = T_{\max} - T_{\min} / T_{\max} = T_4 - T_1 / T_4 = 1 - T_1 / T_4.$$

Задача № 4. Починати розв'язання задачі треба ознайомившись з d - h -діаграмою вологого повітря для барометричного тиску $B = = 745$ мм рт. ст.

Процес в теоретичній сушарці здійснюється у два етапи (див. рисунок). По-перше, процес (ab) підігріву повітря у калорифері. Початковий стан повітря визначається точкою a на перехресті ізотерми $t_a = \text{const}$ та кривої відносної вологості $\phi_a = \text{const}$. Стан повітря після калорифера у точці b визначається на перехресті ізотерми $t_b = \text{const}$ та лінії постійного вологовмісту $d_a = \text{const}$ згідно

з тим, що вологовміст повітря у процесі підігріву не змінюється. Після калорифера повітря надходить у сушарку, де здійснюється адіабатне насичення повітря вологою, тобто процес іде з $h = \text{const}$. На перехресті лінії $h_b = \text{const}$ і $t_c = t_b - \Delta t = \text{const}$ знаходиться точка c кінцевого стану повітря. Для точок a , b та c знаходимо значення ентальпії та вологовмісту, які далі використовуємо у розрахунках.



Для аналітичного розв'язання задачі, по-перше, треба з таблиці термодинамічних властивостей води і водяної пари визначити тиск насичення водяної пари P_s , який відповідає температурі t_a . У подальшому слід використовувати такі розрахункові залежності:

вологовміст повітря: $d = 0,622\phi P_s / (B - \phi P_s)$ кг/кг с.п.;

ентальпія вологого повітря: $h = t + d(2501 + 1,93t)$ кДж/кг с.п.;

питома витрата повітря на випадіння 1 кг вологи

$$G_n = 1/(d_c - d_a) \text{ кг с.п./кг вологи};$$

питома витрата теплоти у калорифері на 1 кг с.п. $q = h_b - h_a$ кДж/кг с.п.;

питома витрата теплоти на 1 кг вологи, що випаровується $Q = G_n q$ кДж/кг вологи.

Примітка. Різниця між розрахунками за допомогою $h-d$ -діаграми вологого повітря та за допомогою аналітичних залежностей не повинна перевищувати 3...5 %.

Задача № 5. По-перше, слід побудувати процес стиснення повітря у $v-P$ та $s-T$ -діаграмах, наприклад, як зображено на рисунках для одно- та двоступеневого стиснення.

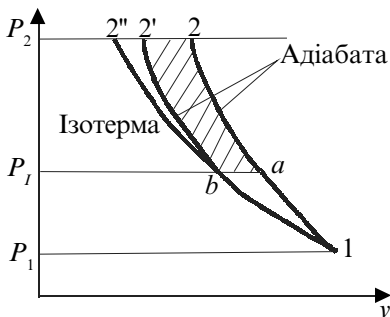
Для визначення кінцевої температури слід використовувати співвідношення термодинамічних параметрів адіабатного процесу, тобто $T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{k-1/k}$, де k – показник адіабати; для повітря взято $k = 1,4$.

Для багатоступеневого стиснення значення проміжних тисків

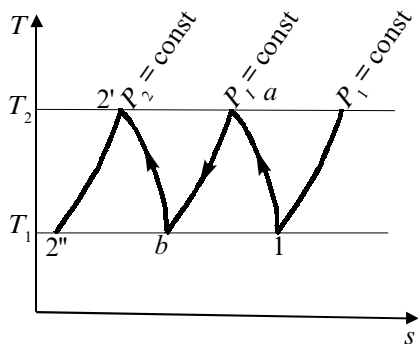
можна визначити за допомогою залежності

$$P_{\text{вих.ст}}/P_{\text{вх.ст}} = \sqrt[m]{P_2/P_1},$$

де m – число ступенів стиснення.



Індикаторна діаграма одно- та двоступеневого стиснення стиснення



Діаграма двоступеневого повітря з проміжним охолодженням

Теоретична робота ступеня адіабатного компресора визначається за допомогою залежності

$$l_0 = \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} R T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \text{ кДж/кг},$$

де R – газова стала для повітря, кДж/(кг·К).

Теоретична потужність двигуна компресора

$$N_0 = M l_0 \text{ кВт},$$

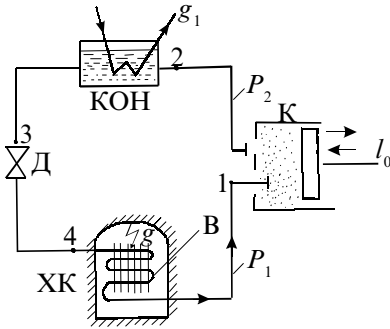
де $M = \rho V$ – масова витрата повітря, кг/с; ρ – питома вага повітря, кг/м³, яка визначається з рівняння стану для повітря.

Для двоступеневого стиснення теоретичну роботу можна визначити як суму робіт двох ступенів стиснення.

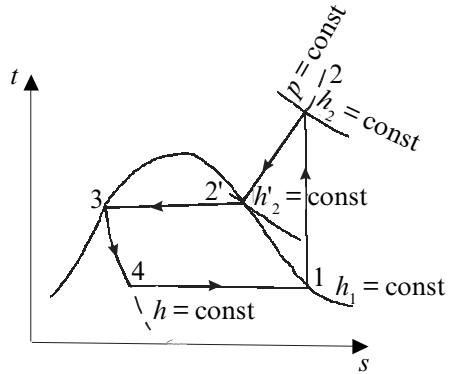
Зробити висновки щодо доцільності використання багатоступеневого стиснення з проміжним охолодженням до початкової температури повітря.

Задача № 6. Для розв'язання задачі слід ознайомитися з прин-

ципом дії парокомпресорної холодильної машини та її циклом. Принципова схема такої холодильної машини, яка працює на аміаку, та теоретичний цикл у $s-t$ -координатах зображені на рисунках.



Принципова схема парокомпресорної холодильної машини



Теоретичний цикл

Насичена аміачна пара з параметрами P_1 , V_1 , t_1 всмоктується компресором К і адиабатно стискається до параметрів P_2 , V_2 , t_2 з витратою роботи l_0 (процес 1–2). Після компресора стиснута пара надходить до конденсатора КОН, де при сталому тиску P_2 теплота q_1 підводиться від пари до охолоджуючої води з повною конденсацією у процесі 2–3, тобто перетворенням до стану рідини. Процес відведення теплоти здійснюється поступово. На початку зі зняттям перегріву пари до стану сухої насиченої (т. 2'), а потім здійснюється повна конденсація у процесі 2'–3. Подалі холодильний агент дроселюється зі зменшенням тиску і температури (процес 3–4). На $s-t$ -діаграмі процес дроселювання зображено кривою $h_3 = \text{const}$. Після дроселювання волога пара надходить до випарника В, який міститься у холодильній камері ХК. У випарнику при сталих тиску P_1 і температурі t_1 здійснюється відведення теплоти q_2 від охолоджуваних об'єктів і внаслідок цього кипіння аміаку, тобто процес вироблення холоду (процес 4–1). Утворена пара знову всмоктується компресором і процес повторюється.

За заданими параметрами тиску P_1 та P_2 слід побудувати теоретичний цикл у $t-s$ -координатах і розрахувати значення тем-

ператур, питомого об'єму, ентальпії, ентропії та сухості пари у характерних точках за допомогою s - t -діаграми аміаку, наприклад, складеної проф. І.І. Левінім. Якщо студент знайде іншу діаграму для аміаку або уточнення параметрів у характерних точках циклу здійснить за допомогою таблиць термодинамічних властивостей аміаку, то це також дозволяється. Як зауваження слід відмітити той факт, що у різних літературних джерелах є розбіжності між значеннями ентальпії (також і ентропії) для однакових точок стану аміаку завдяки довільному вибору початкових значень ентальпії або ентропії.

Для розрахунку потрібних величин слід використовувати наступні залежності:

$$\text{питома холодопродуктивність } q_2 = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 \text{ кДж/кг};$$

$$\text{холодопродуктивність } Q_2 = Mq_2 \text{ кДж};$$

$$\text{холодильний коефіцієнт } \varepsilon = q_2 / (q_1 - q_2) = (h_1 - h_3) / (h_2 - h_1);$$

$$\text{питома витрачена робота } l_0 = q_1 - q_2 = q_2 / \varepsilon;$$

$$\text{робота компресора } L = Ml_0.$$

У наведених формулах M – маса аміаку.

Задача № 7. Для розв'язання задачі перш за все слід визначитись з режимом течії рідини, тобто ламінарна, перехідна або турбулентна, а також з впливом природної конвекції на течію і теплообмін вимушеною конвекцією. Для цього потрібно розрахувати визначальні критерії (числа) процесу Рейнольдса (Re), Грасгофа (Gr) і Прандтля (Pr), тобто

$$\text{число Рейнольдса } Re = wlv;$$

$$\text{число Грасгофа } Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta (t_{ст} - t_f);$$

$$\text{число Прандтля } Pr = \nu/a.$$

У наведені вище критерії (числах подібності) входять такі величини:

w – швидкість руху рідини, м/с;

l – визначальний розмір (для течії у круглих трубах визначальним розміром є внутрішній діаметр d);

ν, a, β – коефіцієнти кінематичної в'язкості, температуропровідності та об'ємного розширення рідини;

g – прискорення сили земного тяжіння;

$t_{ст}, t_f$ – середні температури стінки та рідини.

Теплофізичні константи у числах подібності розраховуються

за визначальною температурою процесу, яка для течії у трубах найчастіше береться середньоарифметичною входу t_1 та виходу t_2 потоку, тобто $t = (t_1 + t_2)/2$.

При значенні чисел $Re > 10^4$ режим течії турбулентний, і впливом природної конвекції слід знехтувати. При $Re < 2000 \dots 2300$ течія ламінарна і слід визначитись з величиною добутку $Gr \cdot Pr$. Якщо цей добуток більш ніж $8 \cdot 10^5$, то слід ураховувати вплив природної конвекції. При $2300 < Re < 10^4$ течія перехідна, і розрахунки слід вести за залежностями для ламінарної течії, але з додатками [3].

Після визначення режиму течії слід підібрати розрахункову критеріальну залежність для середньої тепловіддачі типу $Nu = f(Re, Gr, Pr)$ і розрахувати число $Nu = \alpha l / \lambda$, де λ – коефіцієнт теплопровідності. Потім визначити значення коефіцієнта тепловіддачі.

Тепловий потік, який передається рідині, розраховується за рівнянням теплового балансу $Q = G c_p (t_2 - t_1)$, кВт, де G – витрата рідини, кг/с, яка знаходиться за відомими значеннями швидкості руху, площини перерізу каналу та середньої питомої ваги рідини; c_p – середня за температурами входу та виходу питома теплоємність рідини, кДж/кг·К.

Потрібну довжину труби L (або площину поверхні нагріву F) визначаємо з рівняння тепловіддачі Ньютона – Ріхмана:

$$Q = \alpha F (t_{ct} - t_p) = \alpha \pi d l (t_{ct} - t_p).$$

Примітка. Якщо у розрахунках значення довжини каналу таке, що відношення $l/d < 50$, то слід ураховувати зростання тепловіддачі для коротких каналів. Для цього використовуйте рекомендації, наведені у підручнику [3].

Задача № 8. Для розв'язання задачі слід ознайомитися з d - h -діаграмою вологого повітря. Процес охолодження повітря, якщо він супроводжується конденсацією водяної пари, здійснюється у два етапи. Перший етап – це охолодження повітря від початкової температури t_1 до температури точки роси t_p , тобто до кривої $\phi = 100\%$ по лінії $d_1 = \text{const}$, де $\phi_1, \%$, і d , кг/кг с.п., – значення відносної вологості та вологовмісту повітря. Відповідно початкова точка процесу 1 знаходиться на перехресті ізотерми $t_1 = \text{const}$ і кривої відносної вологості $\phi_1 = 20\%$. Далі процес охолодження йде за кривою $\phi = 100\%$ до кінцевого значення температури t_2 , якому відповідає значення кінцевого вологовмісту повітря d_2 . Для

розрахунків треба з $d-h$ -діаграми зняти відповідні значення ентальпії, вологовмісту та парціального тиску.

Для аналітичного розв'язання задачі слід з таблиць термодинамічних властивостей води та водяної пари знайти за відомими значеннями температур t_1 та t_2 відповідні значення тиску насичення, наприклад, для $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$ $P_s = 0,1234 \cdot 10^5$ Па; $t = 0,01\text{ }^\circ\text{C}$ $P_s = 610,8$ Па.

Далі потрібно розрахувати наступні величини:

вологовміст повітря $d = 0,622 \frac{\phi P_s}{B - \phi P_s}$ кг/кг с.п., де B – атмо-

сферний тиск, Па; питому вагу повітря $\rho = \frac{28,96B - 10,94\phi P_s}{8314(t + 273)}$ кг/м³;

ентальпію вологого повітря $h = t + d(2501 + 1,93t)$ кДж/кг с.п.;
тепловий потік, відведений від повітря, $Q = M(h_1 - h_2)$ кВт;
витрату конденсату з повітря $G = M(d_1 - d_2)$ кг/с.

Примітка. Використовуйте $d-h$ -діаграму вологого повітря, побудовану для значення атмосферного тиску $B = 745$ мм рт. ст. Різниця між даними, отриманими аналітичним розрахунком та за допомогою $d-h$ -діаграми вологого повітря, не повинні перевищувати 3...5 %.

Задача № 9. Виконуємо розрахунки у наступній послідовності:

1. Середня температура повітря $t_{\text{п}} = t_{\text{п}}^{\text{вх}} + t_{\text{п}}^{\text{вх}} / 2$ °С.

2. Площа перерізу труби (по повітряю) $f = n\pi d_{\text{вн}}^2 / 4$ м², де $d_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр труби, м.

3. Швидкість руху повітря у трубах (середня) $w = V/f \cdot 3600 \cdot 273 + t_{\text{п}} / 273$ м/с.

4. Число Рейнольдса $Re = wd_{\text{вн}} / \nu_f$, де ν_f – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с.

5. У залежності від режиму руху вибираємо ту чи іншу критеріальну залежність для середньої тепловіддачі повітря, наприклад, для турбулентного режиму при $Re > 10^4$, нехтуючи початковою ділянкою тепловіддачі, $Nu = 0,021 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43}$, де Pr_f – число Прандтля для повітря (за середньою температурою з теплофізичних таблиць).

За знайденим числом Nu визначаємо коефіцієнт тепловіддачі повітря $\alpha_{\text{п}} = Nu \lambda / d_{\text{вн}}$, де λ_f – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·К).

6. Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі з боку насиченої пари, що конденсується. Для горизонтальних труб з урахуванням додатка на ламінарно-волнову течію плівки конденсату ($\epsilon_t = 1,21$) використовуємо залежність Нусельта

$$\alpha_k = 0,748 \epsilon_t^4 \sqrt{\frac{\lambda_k^3 \rho_k^2 r g}{\mu_k (t_s - t_{ст}) d_{зоб}}} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

де λ_k , ρ_k , μ_k – коефіцієнт теплопровідності, густина та коефіцієнт динамічної в'язкості конденсату; r – питома теплота конденсації водяної пари, Дж/кг; t_s – температура насиченої водяної пари (знаходимо за P_s).

7. Коефіцієнт теплопередачі розраховуємо як для плоскої стінки, якщо співвідношення $d_{зоб}/d_{вн} \leq 1,8$; $k = 1/(1/\alpha_k + \delta_{ст}/\lambda_{ст} + 1/\alpha_n)$.

8. Визначаємо теплопродуктивність із рівняння теплового балансу $Q = \rho_n c_{пн} V (t_n^{внх} - t_n^{вх})$ Вт, де ρ_n , $c_{пн}$ – густина та питома масова теплоємність повітря (за середньою температурою повітря).

9. Поверхню нагріву знаходимо з рівняння теплопередачі

$$F = Q/k(t_s - t_n) \text{ м}^2.$$

10. Довжина труб $l = F/\pi d_{зоб} n$ м.

11. Витрата насиченої пари $G = Q/r$ кг/с.

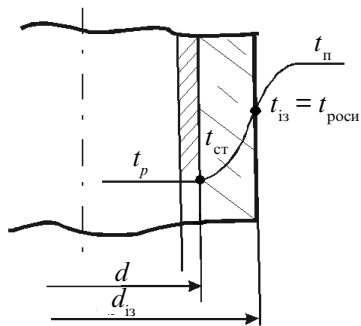
Задача № 10. Розподіл температур за умов прийнятих для розв'язання допущень зображено на рисунку.

Розрахунки виконуємо у наступній послідовності:

1. За допомогою d - h -діаграми вологого повітря знаходимо температуру точки роси за даними t_n та відносної вологості ϕ_n . Таким чином, температура зовнішньої поверхні ізоляції $t_{і3}$ мусить бути не меншою за $t_{роси}$. Для розв'язання задачі візьмемо $t_{і3} = t_{роси}$.

2. Лінійна густина теплового потоку теплопровідністю через шар ізоляції

$$q_l = \frac{\pi(t_{і3} - t_{ст})}{\frac{1}{2\lambda_{і3}} \ln\left(\frac{d_{і3}}{d}\right)}.$$



3. Лінійна густина теплового потоку тепловіддачею до зовнішньої поверхні стінки від повітря $q_l = \alpha \pi d_{\text{із}} (t_{\text{п}} - t_{\text{із}})$.

4. Далі необхідно розв'язати записану систему з двох рівнянь. Можна використовувати графоаналітичний метод, основою якого є рівняння

$$\frac{\pi(t_{\text{із}} - t_{\text{ст}})}{\frac{1}{2\lambda_{\text{із}}} \ln\left(\frac{d_{\text{із}}}{d}\right)} = \alpha \pi d_{\text{із}} (t_{\text{п}} - t_{\text{із}}).$$

Задавшись кількома значеннями невідомої величини діаметра ізоляції $d_{\text{із}}$, знаходимо те єдине значення $d_{\text{із}}$, яке відповідає зазначеному вище рівнянню.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Алабовский А.Н., Недужий И.А.* Техническая термодинамика и теплопередача. – К.: Вища школа, 1990. – 255 с.
2. *Беляев И.М.* Термодинамика. – К.: Вища школа, 1987. – 343 с.
3. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. – М. Энергоиздат, 1981. – 416 с.
4. *Кардашев Ю.Д., Кузнецов В.Г., Куличенко В.А.* Сборник лабораторных работ по дисциплине "Техническая термодинамика". – Николаев: НКИ, 1986. – 64 с.
5. *Кардашев Ю.Д., Кузнецов В.Г., Куличенко В.А.* Расчет газовых смесей: Учеб. пособие. – Николаев: НКИ, 1994. – 37 с.
6. *Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е.* Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
7. *Краснощечков Е.А., Сукомел А.С.* Задачник по теплопередаче. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.
8. *Куличенко В.А., Кардашев Ю.Д.* Расчет и термодинамический анализ циклов тепловых двигателей: Учеб. пособие. – Николаев: НКИ, 1990. – 47 с.
9. *Лобов И.В., Федоровский А.М.* Сборник лабораторных работ по курсу "Тепло- и массообмен". – Николаев: НКИ, 1989. – 52 с.
10. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
11. *Ривкин С.Л.* Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.
12. Теплотехника: Учеб. для вузов / *В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер* и др.; Под ред. *В.Н. Луканина*. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 2000. – 671 с.
13. Техническая термодинамика /Под ред. проф. *В.И. Крутова*. – М.: Высшая школа, 1982. – 439 с.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Технічна термодинаміка	5
Тепло- і масообмін	8
Контрольна робота	12
Контрольні задачі	14
Контрольні запитання	22
Пояснення до задач.....	25
Рекомендована література	37

ДИМО Борис Васильович

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ, ПРОГРАМА І КОНТРОЛЬНІ
ЗАВДАННЯ З ДИСЦИПЛІНИ "ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ
ТЕПЛОТЕХНІКИ"**

Видавництво УДМТУ, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 1150 від 12.12.2002 р.

Редактор І.Ю. Цицюра
Комп'ютерна правка Ю.В. Зайцева
Комп'ютерна верстка А.Й. Тріщ
Коректор Н.О. Шайкіна

Підписано до друку 23. 04. 03. Формат 60×84/16. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 2,4. Обл.-вид. арк. 2,2. Тираж 500 прим.
Вид. № 34. Зам. № 351. Ціна договірна.



ДЛЯ НОТАТОК