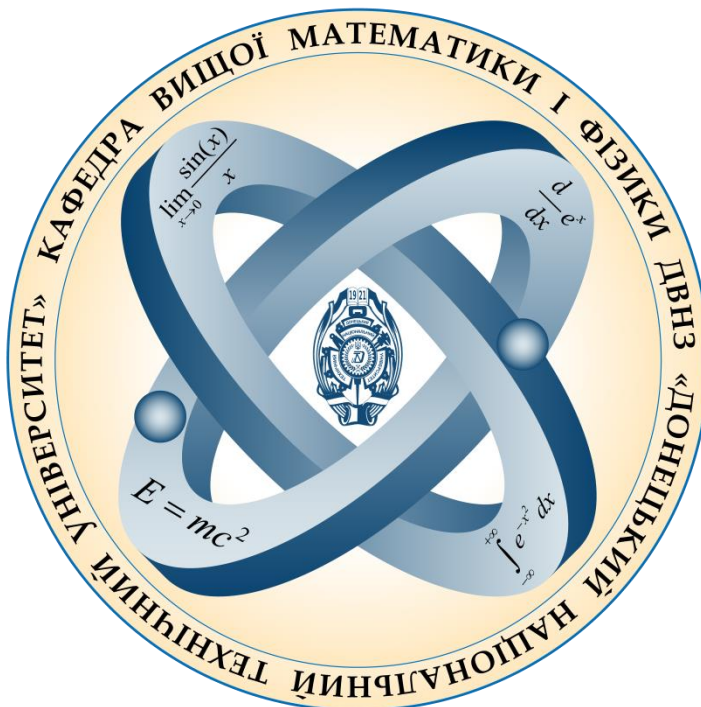


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

КАФЕДРА ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ І ФІЗИКИ



***Методичні вказівки
щодо організації самостійної та
індивідуальної роботи студентів з дисципліни
«Технічна термодинаміка»
для студентів денної та заочної форм навчання
спеціальностей 144 Теплоенергетика,
183 Технології захисту навколишнього середовища***

Покровськ, 2021

УДК

Методичні вказівки щодо організації самостійної та індивідуальної роботи студентів з дисципліни «Технічна термодинаміка» для студентів денної та заочної форм навчання спеціальностей 144 Теплоенергетика та 183 Технології захисту навколишнього середовища /Л.Г. Сергієнко – ДонНТУ, 2021 р.– 30 с.

Мета вказівок – надати методичну та організаційну допомогу студентам щодо організації та реалізації самостійної роботи під час підготовки до практичних занять з курсу технічної термодинаміки.

Вказівки містять технологічні планкарти лекційних та практичних занять із указівкою літератури для самостійної роботи та переліку завдань для самостійного опрацювання, а також умови індивідуальних розрахункових завдань з технічної термодинаміки.

Укладач: Сергієнко Л. Г., к.п.н., доцент кафедри ВМФ

Рецензент: Новікова Ю.В., к. ф.-м. н., доц. кафедри ВМФ

Відповідальний за випуск: Медведєва М. І., зав. кафедрою ВМФ

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол № 7 від 23.03.2021 р.

Розглянуто на засіданні кафедри вищої математики і фізики,
протокол № 3 від 01.03.2021 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Загальні вказівки до самостійної роботи студентів над курсом «Технічна термодинаміка».....	6
2. Програма навчальної дисципліни.....	11
3. Тематичний план лекцій	
3.1. «Технічна термодинаміка –1».....	12
3.2. «Технічна термодинаміка –2»	14
4. Технологічна планкарта лекційних та практичних занять з технічної термодинаміки.....	16
5. Тематика індивідуальних завдань з технічної термодинаміки	
6.1. Приклад рішення завдань на газові суміші та теплоємності.....	17
6.2. Завдання «Основні параметри робочого тіла»	23
6.3. Завдання «Перший закон термодинаміки».....	23
6.4. Завдання «Термодинамічні процеси».....	24
6.5. Завдання «Реальні гази та їх властивості».....	25
6.6. Завдання «Вологе повітря».....	26
6. Питання для підготовки до іспиту з технічної термодинаміки.....	27
Список рекомендованої літератури	29

ВСТУП

Термодинаміка вивчає загальні властивості тіл і різні процеси в них, що супроводжуються перетвореннями енергії, не використовуючи яку-небудь певну модель будови речовини та не висловлюючи припущення про закони взаємодії частинок, з яких складається тіло. Для аналізу великого кола явищ і процесів, вирішення багатьох практичних завдань більш продуктивним виявляється застосування методів термодинаміки.

Термодинаміка – один із розділів фізики, що складаються з найбільш загальних фізичних теорій. Її метод дослідження і закони використовуються в найрізноманітніших галузях науки: в теоретичній фізиці та фізики твердого тіла, фізичній хімії, металургії та металознавстві, в теорії теплових машин, біології, тощо.

Термодинаміка побудована за аксіоматичним принципом: фундаментальні закони природи приймаються в якості основних аксіом, званих засадами (принципами, початками) термодинаміки. З них логічним шляхом виводяться всі наслідки, що характеризують різні термодинамічні системи та процеси, що відбуваються в них. Прийнятий в термодинаміці дедуктивний метод досліджень полягає в суворому математичному розвитку деяких вихідних положень – фізичних постулатів, які є узагальненням багатовікового досліду пізнання природи. Термодинаміка – окрім своїх постулатів – не використовує ніяких гіпотез і теорій будови речовини, що дає змогу досягати впевненості та надійності в розрахунках певних машин та механізмів.

Для аналізу реальних процесів використовуються фізичні величини, що характеризують властивості тіл з макроскопічною кількістю речовини (температура, тиск, об'єм, теплоємність тощо) та енергетичні ефекти, якими супроводжуються процеси (тепловий ефект, механічна робота, електрична робота). Механізми процесів і явищ не розглядаються, тобто класична термодинаміка є феноменологічною наукою. Феноменологічний підхід до досліджень використовується і в інших науках, але в термодинаміці він

отримав найбільший розвиток і тому називається термодинамічним методом дослідження, а класична термодинаміка – феноменологічною термодинамікою. Аналіз робочих процесів різних пристроїв перетворення енергії, тобто технічний додаток термодинаміки, становить важливу складову частину сучасної термодинаміки; цю частину, зважаючи на її велике значення, виділяють в самостійний розділ і називають технічною термодинамікою. Сучасна технічна термодинаміка є основою теорії теплових двигунів, теплових машин і різних пристроїв і технологічних процесів, в яких в якості вихідної енергії, яка зазнає перетворення в робочому процесі, використовується теплота; таке ж основне значення має технічна термодинаміка для прямих перетворювачів енергії, в яких внутрішня енергія тіл або енергія полів перетворюється в енергію електричного струму. Виникнення термодинаміки було викликано потребами практичної теплотехніки. Значення термодинаміки полягає в тому, що вона встановлює принципи найбільш ефективного перетворення різних видів енергії і дає відповідь на першорядний з практичної точки зору питання про те, як організувати робочий процес, щоб коефіцієнт корисної дії був максимальним. Термодинаміка уможливорює прогнозування та оцінку ефективності різних нових способів отримання корисної роботи, що має визначальне значення для вибору напрямків розвитку енергетики та захисту навколишнього середовища.

В технічній термодинаміці розглядають:

- технічні застосування основних принципів термодинаміки до процесів перетворення теплоти у роботу або, навпаки, роботи в теплоту в теплових машинах – двигунах, турбінах, компресорах, холодильниках тощо; розглядаються теоретичні основи роботи теплових машин і оцінки ефективності їх робочих процесів;
- методи прямого перетворення теплоти в електричну енергію;
- процеси теплообміну (теплопровідності);
- теплотехнічні властивості речовин.

1. ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ НАД КУРСОМ “ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА”

Курс «Технічної термодинаміки» включає лекції, практичні заняття, виконання індивідуальних розрахункових робіт, та самостійну роботу над вивченням теоретичного матеріалу. Наприкінці семестру студенти складають іспит (або залік).

Самостійна робота студентів передбачає:

- вивчення лекційного матеріалу;
- підготовку до практичних занять;
- підготовку до контрольних робіт;
- виконання індивідуального завдання;
- вивчення рекомендованої та додаткової літератури.

Предметом технічної термодинаміки є вивчення та засвоєння процесів взаємного перетворення теплової енергії у механічну роботу та навпаки в різних видах теплових машин.

Метою викладання навчальної дисципліни «Технічна термодинаміка» є придбання студентами знань із фундаментальної теоретичної основи теплових машин та енергоустановок, законів взаємного перетворювання різних видів енергії.

Завдання дисципліни. Згідно з вимогами освітньої програми студенти мають здобути **компетентності**:

- здатність вести дослідницьку діяльність, включаючи аналіз проблем, постановку цілей і завдань, вибір способу й методів дослідження, а також оцінку його якості;
- здатність визначати режими експлуатації теплоенергетичного обладнання та застосовувати способи раціонального використання сировинних, енергетичних та інших видів ресурсів;
- здатність застосовувати методи стандартних випробувань щодо визначення фізико-механічних і теплофізичних властивостей та

технологічних показників використовуваних матеріалів і готових виробів теплоенергетичного обладнання;

- здатність забезпечувати моделювання об'єктів і процесів з використанням стандартних пакетів і засобів автоматизації інженерних розрахунків, проводити експерименти за заданими методиками з обробкою й аналізом результатів;

- здатність використовувати стандартні методики планування наукових досліджень, здійснювати обробку та узагальнення результатів експерименту.

Обґрунтування мети даних методичних рекомендацій

У світових напрямках розвитку університетської освіти чітко проявляється тенденція зростання частки самостійної роботи студентів і зміщення акценту з викладання на навчання. У зв'язку з цим стає очевидним, що з переходом на компетентнісний підхід в освіті необхідно формувати систему умінь і навичок самостійної роботи, виховувати культуру самостійної діяльності студентів. Самостійна робота в сучасному освітньому процесі розглядається як форма організації навчання, яка здатна забезпечувати самостійний пошук необхідної інформації, творче сприйняття та осмислення навчального матеріалу в ході аудиторних занять, різноманітні форми пізнавальної діяльності студентів на заняттях і в поза аудиторний час, розвиток аналітичних здібностей, навичок контролю та планування навчального часу, вироблення умінь і навичок раціональної організації навчальної праці. Таким чином, самостійна робота - форма організації освітнього процесу, що стимулює активність, самостійність, пізнавальний інтерес студентів.

Отже, **метою даних методичних вказівок** є допомога студентам в організації самостійної роботи з дисципліни «Технічна термодинаміка», технологічного забезпечення процесу самостійної роботи в умовах бальної рейтингової системи оцінювання навчальних досягнень студентів, а також виконання завдання для індивідуальної роботи з даної дисципліни.

Контрольні та індивідуальні завдання з технічної термодинаміки виконуються після вивчення студентами відповідних розділів курсу з урахуванням наступних вимог:

1. Студент виконує завдання тільки відповідно до свого варіанту.
2. Контрольні роботи виконуються в окремих зошитах або на аркушах формату А-4, залишаючи поля для зауважень рецензента.
3. На титульному листі обов'язково вказується предмет, прізвище та ім'я по-батькові (студента та викладача), номер варіанту, дату виконання роботи (зразок надається).
4. Перш за все, необхідно уважно прочитати умову завдання, записати його в повній і стислій формах.
5. Вказати основні закони та формули, на яких базується рішення цієї задачі, дати пояснення цих законів.
6. Навести креслення, яке пояснює зміст задачі (якщо це необхідно та можливо).
7. Супроводити рішення задачі короткими, але вичерпними поясненнями.
8. Завдання з невеликою кількістю розрахунків слід виконувати в загальному вигляді, а потім у одержані формули підставити чисельні значення величин. Зробити їх перевірку.
9. Для завдань з великою кількістю розрахунків необхідно спочатку показати загальний засіб рішення, скласти відповідні рівняння, які зручніше потім виконувати з підставленими чисельними значеннями.
10. Результати, які одержані під час виконання завдань, слід перевіряти та обґрунтовувати. Оцінити правдоподібність одержаних чисельних результатів, зробити висновки.
11. Якщо під час виконання завдань, або при вивченні навчальної літератури з технічної термодинаміки та спеціальних дисциплін виникають труднощі, необхідно звернутися за консультацією до викладача, вказуючи при цьому на особисті міркування щодо рішення цієї задачі.

У технічній термодинаміці розглядають:

- технічні програми основних принципів термодинаміки до процесів перетворення теплоти в роботу або, навпаки, роботи в теплоту у теплових машинах — двигунах, турбінах, компресорах, холодильниках тощо; розглядаються теоретичні основи роботи теплових машин та оцінки ефективності їх робочих процесів;
- методи прямого перетворення теплоти в електричну енергію;
- процеси теплообміну (теплопровідність, променисте перенесення тощо);
- теплотехнічні властивості речовин.

Метою вивчення дисципліни «Технічна термодинаміка» є формування навичок застосування основних законів технічної термодинаміки для виконання розрахунків, пов'язаних з перетворенням різних видів енергії, роботи, теплоти та аналізом ефективності роботи теплових машин і установок.

Програмні результати навчання:

студент повинен знати:

- основні поняття та закони термодинаміки;
- форми енергообміну тіл;
- термодинамічні процеси;
- диференціальні рівняння термодинаміки та їх застосування;
- методики розрахунків суміші ідеальних газів, парогазової суміші;
- характеристики вологого повітря, діаграми його стану;
- ексергію і анергію енергоресурсів та уміння розраховувати ексергетичний баланс потокових процесів і установок;
- основи теорії тепломеханічних циклів і установок;

студент повинен уміти:

- проводити розрахунки кількості механічної роботи та теплоти;
- проводити розрахунки і аналіз процесів водяної пари із застосуванням таблиць і діаграм;

- оцінювати термодинамічні показники потокових тепломеханічних процесів;
- проводити термодинамічний аналіз основних виробничих процесів;
- робити розрахунки термодинамічних процесів тепло насосних установок та теплових двигунів;
- робити аналіз економічності роботи теплових двигунів згідно з першим та другим принципами термодинаміки.

У результаті освоєння дисципліни «Технічна термодинаміка» студент повинен **знати:**

- основи технічної термодинаміки, теорії тепло масообміну та теорії горіння палива,
- методи та засоби виробництва теплоти,
- класифікацію, особливості пристроїв і установок, їх конструкцію,
- експлуатацію теплотехнічного обладнання, методи, засоби та шляхи економії енергетичних ресурсів,
- методи проектування пристроїв для технологічних процесів.

Вміти:

- підбирати теплотехнічне обладнання для конкретних технологічних процесів,
- ефективно експлуатувати тепло генеруюче та тепло використовуюче обладнання,
- забезпечувати енергозберігаючу технологію в сільському господарстві,
- кваліфіковано вирішувати питання екології.

Володіти:

- сучасними методами, що забезпечують отримання ефективних проектних розробок, що відповідають вимогам перспективного розвитку галузі;
- засобами об'єктивної оцінки можливих позитивних і негативних соціальних, економічних, екологічних та технічних наслідків прийнятих рішень;

- навичками проведення кваліфікованих розрахунків елементів теплоенергетичного обладнання та якісного оформлення технічних рішень на кресленнях;
- навичками організації виробництва та ефективної роботи трудового колективу на основі прогресивних методів управління, контролю за технологічною і трудовою дисципліною в умовах виробництва;
- володіти інженерними методами раціонального використання традиційних і нетрадиційних джерел енергії.

2. Програма навчальної дисципліни

Тема 1. ТД - системи, стан, основні складові ТД - методу. ТД - параметри. Стан ТД - рівноваги та нульове начало ТД. Поняття температури. Рівняння стану ідеального газу. Суміші ідеальних газів. Теплоємність: істинна і середня, ізохорна та ізобарна. Теплоємність сумішей газів.

Тема 2. Види енергії і форми обміну енергією. Внутрішня енергія ТД-системи. Закон збереження і перетворення енергії в ТД. Робота. Властивості роботи як форми обміну енергією. Поняття теплоти. Закон Джоуля. Робоча і теплова діаграма.

Тема 3. Поняття ідеальних газів. Основні ТД - процеси ідеальних газів та її рівняння: ізотермічний, ізобарний, ізохорний, адіабатний, політропний. Перший закон ТД та його застосування до ізопроцесів.

Тема 4. Другий закон ТД для рівноважних ТД – систем (формулювання Клаузіуса і Карно). Основне рівняння рівноважної ТД. Калоричні властивості простих ТД – систем. Зв'язок калоричних та термодинамічних властивостей системи. Ентальпія та ентропія системи. Друге начало ТД для нерівноважних систем.

Тема 5. Другий закон ТД. Колові ТД процеси (цикли). Цикл Карно. Друге начало ТД. Незворотній цикл Карно.

Тема 6. Цикли поршневих двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ):

цикли Отто, Дизеля, цикл зі змішаним підводою теплоти.

Тема 7. Водяний пар і його властивості. Пароутворення при сталому тиску. Визначення параметрів води і водяної пари. HS-діаграма водяної пари.

Тема 8. Вологе повітря: основні поняття. Розрахунок параметрів вологого повітря. HD - діаграма вологого повітря.

Тема 9. Витікання газів та пари. Рівняння першого начала ТД для потоку. Основні рівняння адіабатної течії у каналах. Сопло Лавала.

Тема 10. Дроселювання газів та пари. Рівняння адіабатного дроселювання. Дроселювання водяної пари.

Тема 11. Компресори. Одноступеневе та багатоступеневе стиснення в ідеальному та реальному компресорах.

Тема 12. Цикли паротурбінних установок. Паровий цикл Карно. Цикл Ренкина.

Тема 13. Цикли холодильних установок. Повітряна холодильна установка. Парова холодильна установка. Тепловий насос. Кондиціонери. Термотрансформатори.

Тема 14. Змішання газів і пари у сталому об'ємі; процес змішання потоків. Зміна ентропії при змішанні.

Тема 15. Основи фізичної ТД.

Тема 16. Основи хімічної ТД. Хімічні реакції. Тепловий ефект реакції. Ізобарно-ізотермічний потенціал. Зміна ТД - властивостей речовин при хімічних перетвореннях.

3. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ

Розділ 3.1. Технічна термодинаміка - 1

Тема 3.1.1. Основні поняття

Предмет технічної термодинаміки та її методи. Теплота і робота як форми передачі енергії. Робоче тіло. Властивості робочих тіл. Термодинамічна система. Основні параметри стану. Рівноважний і нерівноважний стани. Термодинамічний процес. Рівноважний і нерівноважний процеси.

Література: [1, Розділ 1: § 1.1. - 1.5.; Контрольні запитання і завдання. 2, гл. 1: § 1.1. – 1.2.].

Тема 3.1.2. Перший закон термодинаміки

Рівняння стану ідеального газу. Теплоємність газів. Масова, об'ємна і мольна теплоємності. Теплоємності при постійному об'ємі та тиску. Суміші ідеальних газів. Внутрішня енергія та робота розширення газу. Перший закон термодинаміки. Ентальпія. Ентропія. Теплова діаграма. Теплоємність суміші ідеальних газів.

Література: [1, Розділ 1: § 1.7. – 1.8.; Розділ 2. § 2.1. – 2.7. Розділ 3. § 3.1. – 3.6. Контрольні запитання і завдання. Розділ 9: § 9.1. – 9.9. 2, гл 1. § 1.4.; гл. 3: § 3.2.].

Тема 3.1.3. Термодинамічні процеси

Класифікація процесів зміни стану. Загальні методи дослідження процесів зміни стану. Термодинамічні процеси ідеальних газів у закритих системах. Особливості термодинамічних процесів у газах при $P = \text{const}$, $V = \text{const}$, $T = \text{const}$, $Q = \text{const}$. Розрахунки термодинамічних параметрів газів для даних процесів. Політропні процеси.

Література: [1, Розділ 4: § 4.1. – 4.8.; Контрольні запитання і завдання. 2, гл. 4: § 4.1. – 4.5.]

Тема 3.1.4. Другий закон термодинаміки

Другий закон термодинаміки. Основні формулювання другого закону термодинаміки. Прямі і оборотні цикли. Прямий цикл Карно. Математичний вираз другого закону термодинаміки. Зміна ентропії у необоротних циклах. Поняття про ексергію.

Література: [1, Розділ 5: § 5.1. - 5.12.; Контрольні запитання і завдання. 2, гл. 7: § 7.4.]

Тема 3.1.5. Реальні гази

Властивості реальних газів. Рівняння стану реальних газів. Поняття "вологе повітря". Вологе повітря та його параметри. Вологовміст, абсолютна і

відносна вологість повітря. Температура точки роси. Термодинамічні процеси реальних газів.

Водяна пара та її властивості. Процес пароутворення. Визначення параметрів води та водяної пари. Pv -, Ts -діаграми процесу пароутворення. hd -Діаграма вологого повітря.

Література: [1, Розділ 8: § 8.1. – 8.6.; Контрольні запитання і завдання. 2, гл.5: § 5.1. – 5.3. гл. 6: § 6.1. - 6.3].

Розділ 3.2. Технічна термодинаміка - 2

Тема 3.2.1. Витікання газів та пари. Рівняння першого начала ТД для потоку. Основні рівняння адіабатної течії у каналах. Сопло Лавала.

Література: [1, Розділ 10.: § 10.1. - 10.7.; Контрольні запитання і завдання. 2, гл. 9: § 9.1. – 9.3.].

Тема 3.2.2. Дроселювання газів та пари. Рівняння адіабатного дроселювання. Дроселювання водяної пари.

Література: [1, Розділ 10: § 10.8. – 10.12; Контрольні запитання і завдання. 2, гл. 9: § 9.4. – 9.5.].

Тема 3.2.3. Компресори. Одноступеневе та багатоступеневе стиснення в ідеальному та реальному компресорах.

Література: [1, Розділ 11: § 11.1. – 11.3.; Контрольні запитання і завдання. 2, гл. 11: § 11.1 – 11.3.].

Тема 3.2.4. Цикли паротурбінних установок. Паровий цикл Карно. Цикл Ренкіна.

Література: [1, Розділ 14: § 4.1. - 14.9.; Контрольні запитання і завдання. 2, гл. 12: § 12.1 – 12.3].

Тема 3.2.5. Цикли холодильних установок. Повітряна холодильна установка. Парова холодильна установка. Тепловий насос. Кондиціонери. Термотрансформатори.

Література: [1, Розділ 15: § 15.1. - 15.5.; Контрольні запитання і завдання. 2, гл. 13: § 13.1. – 13.4].

Тема 3.2.6. Змішання газів і пари у сталому об'ємі; процес змішання

потоків. Зміна ентропії при змішанні.

Література: [1, Розділ 10.: § 10.9. – 10.12.; Контрольні запитання і завдання. 2, гл. 14: § 14.1. - 14.4.].

Тема 3.2.7. Цикли газотурбінних установок.

Література: [1, Розділ 13: § 13.1. – 13.6.; Контрольні запитання і завдання. 2, гл. 3: § 2;].

Тема 3.2.8. Основи хімічної ТД. Хімічні реакції. Тепловий ефект реакції. Ізобарно-ізотермічний потенціал. Зміна ТД - властивостей речовин при хімічних перетвореннях.

Література: [1. Розділ 7.: § 7.6. – 7.10. Контрольні запитання і завдання. 2, гл. 15: § 15.1-15.4]

4. Технологічна планкарта лекційних і практичних занять з ТТД

№ п/п	Найменування тем лекцій	Сітка годин		Література	Завдання для СРС
		ЛЗ	ПЗ		
1	Тема 1. ТД - система, стан, процеси.	2	2	[1] Розділ 1 §1.1.- 1.5	Нульовий закон ТД
2	Тема 2. Теплоємність	2	2	[1] Розділ 3 §3.1-3.6	Визначення істинної та середньої теплоємностей повітря
3	Тема 3. Закони збереження в ТТД	2	2	[1] Розділ 2 § 2.1-2.7 Розділ 5 §5.9; 5.12.	Третій закон ТД
4	Тема 4. ТД - процеси ідеальних газів	2	2	[1] Розділ 4 § 4.1-4.8	Політропні процеси
5	Тема 5. Водяний пар і його властивості.	2	2	[1] Розділ 9 § 9.6-9.7.	Дослідження залежності між тиском і температурою насичення водяної пари
6	Тема 6. Вологе повітря.	2	2	[1] Розділ 9 § 9.8 - 9.9.	Обробка і аналіз термодинамічних діаграм вологого повітря

7	Тема 7. Другий закон ТД.	2	2	[1] Розділ 5.: § 5.1. - 5.12.	Статистичний зміст другого закону ТД
8	Тема 8. Цикли ПДВЗ	2	2	[1] Розділ 12.: §12.1. - 12.5.	Порівняльний аналіз ефективності циклів ПДВЗ
9	Тема 9. Витікання газів та пари.	2	2	[1] Розділ 10, §10.1-10.9	Ізоентропійне витікання газу
10	Тема 10. Дроселювання газів та пари.	2	2	[1] Розділ 10 §10.10-10.12	Ексергетичний аналіз проточних теплових процесів
11	Тема 11. Компресори.	2	2	[1] Розділ 11 § 11.1.-11.3.	Багатоступеневе стиснення
12	Тема 12. Цикли паротурбінних установок	2	2	[1] Розділ 14.: §14.1. - 14.9.	Цикли ядерних енергетичних установок
13	Тема 13. Цикли холодильних машин	2	2	[1] Розділ 15: §15.1; 15.5.	Теплові насоси
14	Тема 14. Змішання газів і пари	2	2	[1] Розділ 10, §10.9.-10.12.	Ежектори
15	Тема 15. Цикли газотурбінних установок	2	2	[1] Розділ 13; §13.1. - 13.6	Цикли реактивних двигунів
16	Тема 16. Основи хімічної ТД.	2	2	[1] Розділ 7 § 7.6. - 7.10	Фазова діаграма Правило Гібса
	Усього годин	32	32	64	86

5. ТЕМАТИКА ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ З ТТД

5.1. Приклад рішення завдань на газові суміші та теплоємності

Задача 1. Газова суміш має наступний склад (1)* відсотковий склад (2); тиск суміші (4) в барах, об'єм суміші (5), температура суміші (6) в °С.

Потрібно визначити:

- 1) (3) склад суміші;
- 2) газові константи компонентів та суміші;
- 3) середню молекулярну масу суміші через об'ємні та масові долі;

- 4) парціальні тиски компонентів через об'ємні та масові доли;
- 5) масу суміші та компонентів;
- 6) парціальні об'єми та густини компонентів;
- 7) густини компонентів та суміші при заданих умовах через об'ємні та масові доли;
- 8) густини компонентів та суміші при нормальних умовах через об'ємні та масові доли;
- 9) істинну мольну, об'ємну (для 1 м^3) та масову теплоємності суміші при $p = \text{const}$ та $V = \text{const}$ для вищевказаної температури суміші;
- 10) середню мольну, об'ємну та масову теплоємності суміші при $p = \text{const}$ та $V = \text{const}$ для інтервалу температур (7);
- 11) затрату тепла на нагрівання (охолодження) при $p = \text{const}$ двох молей, 5 м^3 та 7 кг суміші у вищевказаному інтервалі температур.

Дано:

1. Суміш має наступний об'ємний склад;

$\text{CO}_2 = 12\%$	$r_{\text{CO}_2} = 0.12$
$\text{N}_2 = 75\%$	$r_{\text{N}_2} = 0.75$
$\text{H}_2\text{O} = 8\%$	$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0.008$
$\text{O}_2 = 5\%$	$r_{\text{O}_2} = 0.005$

Усього ... 100% $\sum r_i = 1.0$

2. Об'єм суміші $V_{\text{см}} = 3 \text{ м}^3$,
тиск суміші $p_{\text{см}} = 1 \text{ бар}$ (10^5 н / м^2);
температура суміші $t_{\text{см}} = 100^\circ \text{C}$ ($T_{\text{см}} = 373^\circ \text{K}$).
3. Температура, при якій визначається істинна теплоємність суміші
 $t = 2000^\circ \text{C}$ ($T = 2273^\circ \text{K}$).
4. Інтервал температур, для якого визначається середня теплоємність суміші:
 $t_1 = 200^\circ \text{C}$ ($T_1 = 473^\circ \text{K}$),
 $t_2 = 1000^\circ \text{C}$ ($T_2 = 1273^\circ \text{K}$).

Розв'язок завдання

- 1) Визначення масового складу суміші:

$$g_i = \frac{r_i u_i}{\sum r_i u_i},$$

$$g_{\text{CO}_2} = \frac{0.12 \cdot 44}{0.12 \cdot 44 + 0.75 \cdot 28 + 0.08 \cdot 18 + 0.05 \cdot 32} = \frac{5.28}{29.32} = 0.180$$

$$g_{N_2} = \frac{0.75 \cdot 28}{29.32} = 0.716$$

$$g_{H_2O} = \frac{0.08 \cdot 18}{29.32} = 0.049$$

$$g_{O_2} = \frac{0.05 \cdot 32}{29.32} = 0.055$$

$$\sum g_i = 1.000$$

2) Визначення газових константних компонентів суміші:

$$R_i = \frac{8.314}{n} \text{ кдж / кг} \cdot \text{град},$$

$$R_{CO_2} = \frac{8.314}{44} = 0.189; \quad R_{N_2} = \frac{8.314}{28} = 0.297$$

$$R_{H_2O} = \frac{8.314}{18} = 0.462 \quad R_{O_2} = \frac{8.314}{32} = 0.260$$

3) Визначення газової константи суміші:

$$R_{cm} = \sum g_i R_i,$$

$$R_{cm} = 0.18 \cdot 0.189 + 0.716 \cdot 0.297 + 0.049 \cdot 0.462 + 0.055 \cdot 0.260 = 0.284 \text{ кдж / кг} \cdot \text{град}.$$

4) Визначення середньої молекулярної маси суміші:

а) через об'ємні долі:

$$\eta_{cm} = \sum r_i \eta_i,$$

$$n_{cm} = 0.12 \cdot 44 + 0.75 \cdot 28 + 0.08 \cdot 18 + 0.050 \cdot 32 = 29.32 \text{ кг / моль}$$

$$(\text{перевірка } n_{cm} = \frac{8.314}{R_{cm}} = \frac{0.314}{0.284} = 29.32);$$

б) через масові долі:

$$\eta_{cm} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\eta_i}},$$

$$\eta_{cm} = \frac{1}{\frac{0.18}{44} + \frac{0.716}{28} + \frac{0.049}{18} + \frac{0.055}{32}} = \frac{1}{0.03413} = 29.32 \text{ кг / моль}$$

5) Визначення парціальних тисків компонентів:

а) через об'ємні долі:

$$p_i = p_{cm} \cdot r_i,$$

$$p_{CO_2} = 1.0 \cdot 0.12 = 0.12 \text{ бар}$$

$$p_{N_2} = 1.0 \cdot 0.75 = 0.75 \text{ бар}$$

$$p_{H_2O} = 1.0 \cdot 0.08 = 0.08 \text{ бар}$$

$$p_{O_2} = 1.0 \cdot 0.05 = 0.05 \text{ бар}$$

$$\sum p_i = p_{cm} = 1.0 \text{ бар};$$

б) через масові долі:

$$p_i = p_{cm} * g_i \frac{R_i}{R_{cm}},$$

$$p_{CO_2} = 1.0 * 0.18 \frac{0.189}{0.284} = 0.12 \text{ бар}$$

$$p_{H_2} = 1.0 * 0.716 \frac{0.297}{0.284} = 0.75 \text{ бар}$$

$$p_{H_2O} = 1.0 * 0.049 \frac{0.462}{0.284} = 0.08 \text{ бар}$$

$$p_{O_2} = 1.0 * 0.055 \frac{0.260}{0.284} = 0.05 \text{ бар}$$

$$\sum p_i = p_{cm} = 1.0 \text{ бар};$$

6) Визначення маси суміші:

$$M_{cm} = \frac{p_{cm} V_{cm}}{R_{cm} T_{cm}},$$

$$M_{cm} = \frac{1.0 * 10^6 * 3}{0.284 * 10^3 * 373} = 2.83 \text{ кг}$$

7) Визначення маси компонентів:

$$M_i = M_{cm} * g_i,$$

$$M_{CO_2} = 2.083 * 0.18 = 0.51 \text{ кг}$$

$$M_{N_2} = 2.083 * 0.715 = 2.025 \text{ кг}$$

$$M_{H_2O} = 2.083 * 0.049 = 0.139 \text{ кг}$$

$$M_{O_2} = 2.083 * 0.055 = 0.156 \text{ кг}$$

$$\sum M_i = M_{cm} = 2.83 \text{ кг}$$

8) Визначення парціальних об'ємів компонентів:

$$V_i = r_i V_{cm} \text{ (при } p_{cm} \text{ та } T_{cm} \text{)}$$

$$V_{CO_2} = 0.12 * 3 = 0.36 \text{ м}^3,$$

$$V_{N_2} = 0.75 * 3 = 2.025 \text{ м}^3,$$

$$V_{H_2O} = 0.08 * 3 = 0.24 \text{ м}^3,$$

$$V_{O_2} = 0.05 * 3 = 0.15 \text{ м}^3,$$

$$\sum V_i = V_{cm} = 3.00 \text{ м}^3.$$

9) Визначення парціальної густини компонентів (при p_i та T_{cm}):

$$\rho_i' = \frac{M_i}{V_{cm}},$$

$$\rho_{CO_2}' = \frac{0.51}{3} = 0.17 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

$$\rho_{N_2}' = \frac{2.025}{3} = 0.675 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

$$\rho_{H_2O}' = \frac{0.139}{3} = 0.0463 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

$$\rho_{O_2}' = \frac{0.156}{3} = 0.052 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

10) Визначення густин компонентів при заданих умовах (при p_i та T_{cm}):

$$\rho_i' = \frac{M_i}{V_{cm}},$$

$$\rho_{CO_2}' = \frac{0.51}{0.36} = 1.42 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

$$\rho_{N_2}' = \frac{2.025}{2.25} = 0.9 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

$$\rho_{H_2O}' = \frac{0.139}{0.24} = 0.58 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

$$\rho_{O_2}' = \frac{0.156}{0.15} = 1.04 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

11) Визначення густини суміші при заданих умовах при (при p_i та T_{cm}):

а) через об'ємні долі:

$$\rho_{cm} = \sum r_i \rho_i,$$

$$\rho_{cm} = 0.12 \cdot 1.42 + 0.75 \cdot 0.9 + 0.08 \cdot 0.58 + 0.05 \cdot 1.04 = 0.9433 \text{ кг} / \text{м}^3;$$

б) через масові долі:

$$\rho_{cm} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\rho_i}},$$

$$\rho_{cm} = \frac{1}{\frac{0.18}{1.42} + \frac{0.716}{0.9} + \frac{0.049}{0.58} + \frac{0.055}{1.04}} = 0.9433 \text{ кг} / \text{м}^3;$$

в) через парціальні густини компонентів:

$$\rho_{cm} = \sum \rho_i',$$

$$\rho_{cm} = 0.17 + 0.675 + 0.0463 + 0.052 = 0.9433 \text{ кг} / \text{м}^3$$

$$(\text{перевірка } \rho_{cm} = \frac{M_{cm}}{V_{cm}} = \frac{2.83}{3} = 0.9433).$$

12) Визначення густини компонентів при нормальних фізичних умовах (при $p = 760$ мм рт. ст. = 1.013 бар та $t = 0^\circ \text{C} = 273^\circ \text{K}$):

$$\rho_i = \frac{n_i}{22.4} \text{ кг} / \text{м}^3,$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{44}{22.4} = 1.96 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

$$\rho_{\text{N}_2} = \frac{28}{22.4} = 1.25 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{18}{22.4} = 0.8 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

$$\rho_{\text{O}_2} = \frac{32}{22.4} = 1.43 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

13) Визначення густини суміші при нормальних умовах:

а) через об'ємні долі:

$$\rho_{\text{см}} = \sum r_i \rho_i,$$

$$\rho_{\text{см}} = 0.12 * 1.96 + 0.75 * 1.25 + 0.08 * 0.05 * 1.43 = 1.3085 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

б) через масові долі:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\rho_i}},$$

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\frac{0.18}{1.96} + \frac{0.716}{1.25} + \frac{0.049}{0.8} + \frac{0.055}{1.43}} = 1.3085 \text{ кг} / \text{м}^3$$

$$(\text{перевірка } \rho_{\text{см}} = \rho_{\text{см}} \frac{T_{\text{см}} 1.013 * 10^5}{\rho_{\text{см}}} = 0.9433 \frac{373 * 1.013 * 10^5}{273 * 10^5} = 1.3085).$$

14) Визначення істинних теплоємностей суміші (при $t = 2000^\circ \text{C}$):

а) мольна:

$$\eta c_{p_{\text{см}}} = \sum r_i \eta c_{p_i},$$

$$\eta c_{p_{\text{см}}} = 0.12 * 66.6628 + 0.75 * 36.1958 + 0.08 * 52.9371 + 0.05 * 38.4110 = 37.1 \text{ кДж} / \text{моль} * \text{град},$$

$$\eta c_{p_v} = \eta c_{p_p} - 8.314 \text{ кДж} / \text{моль} * \text{град},$$

$$\eta c_{p_{\text{см}}} = 37.1 - 8.314 = 28.786 \text{ кДж} / \text{моль} * \text{град};$$

б) об'ємна

$$C_{p_{\text{см}}} = \frac{\eta c_{p_{\text{см}}}}{22.4} = \frac{37.1}{22.4} = 1.67 \text{ кДж} / \text{м}^3 * \text{град},$$

$$C_{v_{\text{см}}} = \frac{\eta c_{v_{\text{см}}}}{22.4} = \frac{28.786}{22.4} = 1.28 \text{ кДж} / \text{м}^3 * \text{град};$$

в) масова

$$C_{p_{\text{см}}} = \frac{\eta c_{p_{\text{см}}}}{\eta_{\text{см}}} = \frac{37.1}{29.32} = 1.27 \text{ кДж} / \text{кг} * \text{град},$$

$$C_{p_{\text{см}}} = \frac{\eta c_{v_{\text{см}}}}{\eta_{\text{см}}} = \frac{28.761}{29.32} = 0.98 \text{ кДж} / \text{кг} * \text{град},$$

15) Визначення середніх теплоємностей суміші:

а) мольна

$$\eta c_{p_{cm}} \bar{I} = \frac{\eta c_{p_{cm}} \bar{I}^* t_2 - \eta c_{p_{cm}} \bar{I}^* t_1}{t_2 - t_1},$$

$$\text{Де } \eta c_{p_{cm}} \bar{I} = \sum \eta c_{p_i} \bar{I}^* r_i;$$

$$\eta c_{p_{cm}} \bar{I}_0^{t_2=1000} = 0.12 * 49.3987 + 0.75 * 31.2003 + 0.08 * 38.6245 + 0.05 * 33.1223 = 34.07 \text{ кДж / моль} * \text{град},$$

$$\eta c_{p_{cm}} \bar{I}_0^{t_1=200} = 0.12 * 40.0650 + 0.75 * 29.1359 + 0.08 * 34.1231 + 0.05 * 29.9357 = 30.886 \text{ кДж / моль} * \text{град},$$

$$\eta c_{p_{cm}} \bar{I}_{t_1=200}^{t_2=1000} = \frac{34.07 * 1000 - 30.886 * 200}{1000 - 200} = 34.87 \text{ Дж / моль} * \text{град},$$

$$\eta c_{v_{cm}} \bar{I} = \eta c_{p_{cm}} \bar{I} - 8.314,$$

$$\eta c_{v_{cm}} \bar{I}_{t_1=200}^{t_2=1000} = 34.87 - 8.314 = 26.556 \text{ кДж / моль} * \text{град},$$

б) об'ємна

$$C_{p_{cm}} \bar{I}_{t_1}^{t_2} = \frac{\eta C_{p_{cm}} \bar{I}_{t_1}^{t_2}}{22.4} = \frac{34.87}{22.4} = 1.556 \text{ кДж / м}^3 * \text{град},$$

$$C_{v_{cm}} \bar{I}_{t_1}^{t_2} = \frac{\eta C_{v_{cm}} \bar{I}_{t_1}^{t_2}}{22.4} = \frac{26.556}{22.4} = 1.185 \text{ кДж / м}^3 * \text{град};$$

$$C_{p_{cm}} \bar{I}_{t_1}^{t_2} = \frac{\eta C_{p_{cm}} \bar{I}_{t_1}^{t_2}}{\eta_{cm}} = \frac{34.87}{29.32} = 1.189 \text{ кДж / кг} * \text{град},$$

$$C_{v_{cm}} \bar{I}_{t_1}^{t_2} = \frac{\eta C_{v_{cm}} \bar{I}_{t_1}^{t_2}}{\eta_{cm}} = \frac{26.556}{29.32} = 0.906 \text{ кДж / кг} * \text{град}.$$

Примітка. Середні мольні теплоємності беруться з таблиці для температур $t_1 = 200^\circ \text{C}$ та $t_2 = 1000^\circ \text{C}$.

16) Визначення втрат тепла на нагрівання у процесі:

а) двох молей суміші:

$$Q' = 2 * \eta c_{p_{cm}} \bar{I}_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1),$$

$$Q' = 2 * 34.87 * (1000 - 200) = 55800 \text{ кДж};$$

б) 5 м^3 суміші

$$Q' = 5 * C_{p_{cm}} \bar{I}_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1),$$

$$Q' = 5 * 1.556 * (1000 - 200) = 6230 \text{ кДж};$$

в) 7 кг суміші

$$Q' = 7 * c_{p_{cm}} \bar{I}_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1),$$

$$Q' = 7 * 1.189 * (1000 - 200) = 6600 \text{ кДж}.$$

Література: [9. Завдання 1, с. 296]

5.2. Завдання «Основні параметри робочого тіла»

Задача 2. Газова суміш складається з декількох компонентів, зміст яких у суміші наведено у відсотках за об'ємом r_i в таблиці 1.

Визначити:

- молекулярну масу суміші;
- газову постійну суміші;
- середні мольну, об'ємну і масову теплоємності суміші при
- постійному тиску в межах температур від t_1 до t_2 .

Таблиця 1 – Вихідні дані задачі 1.1

Перша цифра варіанта	r_i				Друга цифра варіанта	Температура суміші	
	CO ₂	O ₂	N ₂	CO		$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
0	20	5	75	-	0	126	528
1	18	4	78	-	1	366	926
2	14	3	83	-	2	592	1492
3	8	10	82	-	3	818	1217
4	18	-	72	10	4	286	1182
5	12	-	74	14	5	456	813
6	10	-	60	30	6	626	1342
7	24	-	50	26	7	918	1566
8	20	-	52	28	8	742	1643
9	32	-	50	18	9	1342	2143

Література: [9. Гл.1, с.6]

5.3. Завдання «Перший закон термодинаміки»

Задача 3. У балоні об'ємом V знаходиться газ під тиском P_1 при температурі t_1 . У результаті додаткового накачування цього ж газу в балон тиск у ньому став P_2 , а температура збільшилась до t_2 . Визначити масу газу в балоні до

накачування m_1 і після накачування m_2 , густину газу в першому і другому станах ρ_1 і ρ_2 , а також продуктивність компресора G , якщо для збільшення маси газу від m_1 до m_2 було витрачено час, якій дорівнює τ . При цьому тиск P_1 і P_2 визначався за манометром при атмосферному тиску $P_{атм}=100$ кПа. Вихідні дані для розв'язання задачі взяти з таблиці 2.

Таблиця 2 – Вихідні дані задачі 1.2

Перша цифра шифру	Газ	P_1 , МПа	t_1 , °C	V , м ³	Друга цифра шифру	P_2 , МПа	t_2 , °C	τ , мін
0	Нітроген	0,15	10	0,2	0	0,85	20	20
1	Водень	0,20	20	0,3	1	0,90	25	30
2	Аргон	0,25	30	0,4	2	1,00	37	40
3	Аміак	0,30	40	0,5	3	1,80	48	50
4	Метан	0,05	50	0,6	4	0,30	60	60
5	Етилен	0,10	50	0,7	5	0,70	55	50
6	Повітря	0,15	40	0,8	6	0,80	50	40
7	CO ₂	0,20	30	0,7	7	1,45	37	30
8	CO	0,25	20	0,6	8	2,70	31	20
9	Кисень	0,30	10	0,5	9	2,90	18	10

Література: [5. с.25]

5.4. Завдання «Термодинамічні процеси»

Задача 4. Визначити параметри повітря на початок і наприкінці політропного процесу з показником n , якщо відомо, що початковий стан визначається параметрами P_1 и t_1 , а в кінцевому стані температура газу дорівнює t_2 . При цьому маса газу, що бере участь у процесі, дорівнює m . Визначити також зміну внутрішньої енергії, зміну ентальпії, зміну ентропії, теплоту процесу. Залежність теплоємності від температури взяти лінійною.

Зобразити процес у довільному масштабі в ***PV***- і ***TS***-координатах. Вихідні дані для розв’язання задачі взяти з таблиці 3.

Таблиця 17 – Вихідні дані задачі 1.3

Перша цифра шифру	Показник політропи, n	t_1 , °C	t_2 , °C	Друга цифра шифру	P_1 , МПа	m , кг
0	1,22	200	350	0	4,1	12
1	1,25	300	400	1	2,2	5
2	0,85	400	490	2	1,4	8
3	1,31	500	580	3	3,1	15
4	$n=k=1,4$	350	400	4	0,5	9
5	1,33	270	350	5	2,2	6
6	1,09	180	270	6	1,4	7
7	1,35	80	140	7	3,6	16
8	1,22	120	200	8	2,5	21
9	1,20	90	210	9	3,7	13

Література: [9. с. 6, 41]

Завдання 5.5. «Реальні гази та їх властивості»

Задача 5. Робоче тіло – водяна пара, що має в початковому стані тиск P_1 і температуру t_1 . Маса робочого тіла – m кг. Пара розширюється до тиску P_2 . Схематично побудувати процес адіабатичного розширення водяної пари на hs -діаграмі.

Визначити:

- 1) питомий об’єм і ентальпію пари в початковому стані;
- 2) температуру, питомий об’єм, ступінь сухості та ентальпію пари в кінцевому стані;
- 3) значення внутрішньої енергії пари до і після розширення;
- 4) роботу розширення пари в адіабатному процесі. Вихідні дані для розв’язання

задачі взяти з таблиці 4.

Таблиця 4 – Вихідні дані задачі 1.4

Перша цифра шифру	t_1 , °C	P_1 , МПа	Друга цифра шифру	Маса m , кг	P_2 , МПа
0	300	2	1	5	0,003
1	400	3	2	3	0,004
2	320	4	3	7	0,005
3	370	5	4	8	0,006
4	450	6	5	10	0,007
5	520	7	6	12	0,008
6	500	8	7	16	0,009
7	380	9	8	15	0,010
8	430	10	9	20	0,015
9	530	11	0	25	0,020

Література: [9. Гл.9 с. 82]

5.6. Завдання «Вологе повітря»

Задача 6. Водяна пара об'ємом V_1 з тиском P_1 і початковою температурою t_1 розширюється адіабатичне до кінцевого тиску P_2 . Визначити параметри кінцевого стану і роботу розширення пари.

Вихідні дані для розв'язання задачі взяти з таблиці 5.

Таблиця 5 – Вихідні дані задачі 1.5

Перша цифра шифру	t_1 , °C	P_1 , МПа	Друга цифра шифру	Об'єм V_1 , м ³	P_2 , кПа
0	350	2,5	0	2	5,00
1	320	2,0	1	4	50,0

2	340	3,6	2	6	10,0
3	550	12,0	3	8	20,0
4	450	5,0	4	10	6,00
5	440	4,0	5	12	3,00
6	500	9,0	6	14	6,00
7	550	15,0	7	16	80,0
8	320	3,0	8	18	30,0
9	600	10,0	9	20	60,0

Література: [9. Гл.9 с. 84]

6. ПИТАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ІСПИТУ З ТТД

1. Предмет і метод ТД-аналізу. Термодинамічна система і навколишнє середовище. Кількість субстанцій.
2. Робоче тіло, види, ТД-параметри. ТД-процес. Визначення абсолютного тиску робочого тіла.
3. Нульовий закон ТД. Рівновага в ТД-системі.
4. Рівняння стану ідеальних газів. Газова стала.
5. Суміші ідеальних газів. Закон Дальтона. Способи задавання газових сумішей. Закони ідеальних газів та їх графічна інтерпретація.
6. Теплоємність ідеальних газів: види, залежність від факторів, засоби визначення. МКТ теплоємності.
7. Внутрішня енергія робочого тіла. Робота розширення газів.
8. Перший закон термодинаміки. Ентальпія, її визначення.
9. Ентропія. TS -діаграма.
10. Другий закон термодинаміки. Кругові термодинамічні процеси. Статистичний зміст другого началу ТД.
11. Коловий процес або цикл. Зворотній цикл Карно. Поняття термічного ККД.
12. Термодинамічні процеси ідеальних газів: ізохорний, ізобарний, ізотермічний, адіабатний, політропний.

13. Перший закон термодинаміки для стаціонарного потоку газу. Наявна робота.
14. Витікання газів через отвори. Основні рівняння витікання газів. Вплив профілю каналу на швидкість витікання.
15. Дроселювання газів.
16. Термодинаміка реальних газів. Основні визначення властивостей реальних газів. Рівняння стану реальних газів.
17. Процеси утворення водяної пари. Діаграми $P-V$, $T-S$ та $h-S$.
18. Атмосферне повітря: характеристики, $h-d$ -діаграма.
19. Термодинаміка потоку. Основні характеристики відкритих ТД-систем. Перший закон ТД для стаціонарного потоку. Наявна робота.
20. Ізоентропійне витікання газу із звуженого сопла.
21. Основні закономірності потоку ідеального газу у соплах і дифузорах. Сопла Лавалю.
22. Робочі процеси у компресорах. Багатоступеневе стиснення.
23. Цикли поршневих двигунів внутрішнього згоряння (ПДВЗ). Принцип дії ПДВЗ.
24. Цикли газотурбінних установок (ГТУ). Цикли реактивних двигунів.
25. Цикли паросилових установок (ПСУ).
26. Зворотні цикли теплових машин. Холодильні установки.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Основна література

1. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. / О. Ф. Буляндра. - К.: Техніка, 2006. - 319 с.
2. Бородин А.И. Лекции по технической термодинамике. Учебное пособие. — Томск: Изд-во Томск. гос. архит.- строит. ун-та, 2008. — 170 с.: ил. — ISBN 978-5-93057-249-0.
3. Константинов С. М. Технічна термодинаміка / С. М. Константинов. - К.: Політехніка, 2001. - 368 с.
4. Чепурний М. М., Ткаченко С. И. Основы технічної термодинаміки / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. - Вінниця: Політехніка, 2004. -310 с.
5. Пеньков В.І. Технічна термодинаміка: Навчальний посібник / В.І. Пеньков. - Рівне: НУВГП, 2010. - 209 с. / [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://ep3.nuMTn.edu.ua/1683/>.
6. Приходько М. А. Термодинаміка та теплопередача: Навчальний посібник / М. А. Приходько, Г. Г. Герасимов. - Рівне: НУВГП, 2008. - 250 с.: іл. / [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://ep3.nu\4m.edu.ua l 847/>.
7. Беляев Н.М. Термодинамика. - Вища школа, - 1987. - 344с.
8. Кириллин В.А. и др. Техническая термодинамика. - М: Энергия, - 1968.
9. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче. Под редакцией Б.Н. Юдаева, М., 1986.
10. Власенко М.М. Конспект лекцій з дисципліни «Термодинаміка» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» денної та заочної форм навчання, <http://ea.donntu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/29168>

Допоміжна література

1. Баскаков, А.П. Теплотехника: учебник для вузов / А.П. Баскаков [и др.]; под ред. А.П. Баскакова. — 2-е изд., перераб. — М.: Энергоиздат, 1991. — 224 с.
2. Гуржий, А.А. Теплотехника / А.А.Гуржий, П.И.Огородников. — К.: Издательский дом «Слово», 2003. — 254 с. — ISBN 966-8407-05-9.
3. Дементий, Л.В. Краткий курс лекций по дисциплине «Теоретические

основы теплотехники» / Л.В. Дементий, А.П. Авдеенко. – Краматорск: ДГМА, 2000. – 168 с. – ISBN 5-7763-2051-8.

4. Дементий, Л.В. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче / Л.В. Дементий, А.А.Кузнецов, Ю.В. Менафова. – Краматорск : ДГМА, 2002. – 260с. – ISBN 5-7763-2069-0.

5. Драганов, Б.Х. Теплотехніка / Б.Х. Драганов [та ін.]; за ред. Б.Х. Драганова. – К.: ІНКОС, 2005. – 504 с. – ISBN 966-8347-23-4.

6. Ерофеев, В.А. Теплотехника: учебник для вузов / В.А. Ерофеев, П.Д. Семенов, А.С. Пряхин; под ред. В.А. Ерофеева. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 456 с. – ISBN 5-94628-227-1.

7. Кривандин, В.А. Металлургическая теплотехника. В 2-х томах. Т.1. Теоретические основы: учебник для вузов / В.А. Кривандин [и др.]; под ред. В.А. Кривандина. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.

8. Коновалова, С.А. Лабораторный практикум по курсам «Теоретические основы теплотехники», «Теплотехника и теплоэнергетика» / С.А. Коновалова, Ю.В. Менафова, А.П. Авдеенко. – Краматорск: ДГМА, 2005. – 164 с. – ISBN 5-7763-1355-4.

9. Лабай, В.Й. Тепломасообмін / В.Й. Лабай. – Львів: Тріада Плюс, 2004. – 260 с. – ISBN 5-7763-8829-5.

10. Луканин, В.Н. Теплотехника: учебник / В.Н.Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – 4-е изд., испр. – М.: Высш.шк., 2003. – 671с. – ISBN 5-06-03958-7.

11. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. – М.: Высш. шк., 1986. – 469 с.

12. Шоно, С.А. Посібник-довідник до лекційних курсів «Теплотехніка та теплоенергетика» і «Теоретичні основи теплотехніки» / С.А. Шоно, Ю.В. Менафова. – Краматорськ : ДДМА, 2001.– 136 с.– ISBN 5-7763-8552-0.